

# **Technická univerzita v Liberci**

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Bakalářský studijní program:

strojírenská technologie

Zaměření:

obrábění a montáž

## **Využití signálu ze snímače síly pro řízení vrtačky**

## **Using signal from sensors on the power for control drill**

**KOM - 1164**

***Michal Goldman***

Vedoucí práce:

Doc. Ing. Jan Jersák, CSc.

Konzultant:

Ing. Miloš Hernych (TUL; FM)

Ing. Jaroslav Votoček

Počet stran:

83

Počet příloh:

2

Počet obrázků:

62

Počet tabulek:

1

Počet diagramů:

7

2012

## Využití signálu ze snímače síly pro řízení vrtačky

### ANOTACE:

Práce se zabývá obráběcím procesem vrtání. Cílem práce bylo navrhnutí vhodného PLC programu pro řízení obráběcího procesu. Z tohoto důvodu byly uskutečněny experimenty vrtání, při kterých byla získávána data o průběhu posuvových sil a kroutících momentů v závislosti na čase a na opotřebení břitu vrtáku. Posuvové síly a kroutící momenty byly měřeny pomocí tenzometrického dynamometru. Na základě zjištěných dat byly zvoleny mezní stavy a byl navržen PLC program. Funkčnost PLC programu byla prakticky ověřena.

## Using signal from sensors on the power for control drill

### ANNOTATION:

This work look into the drilling process. The target of the work was to design a suitable PLC program to control the drilling process. For this reason drilling experiments were carried out. Monitoring of feeding forces and drilling torques gave data which were collected depending on the time and wear on the cutting edge of the drill. The feeding forces and drilling torques were measured using strain-gauge dynamometer. Based on collected data limit states were selected and PLC program was designed. The functionality of the PLC program has been verified in practice.

Klíčová slova: OBRÁBĚNÍ, PROCES VRTÁNÍ, DYNAMOMETR, PLC

Zpracovatel:	TU v Liberci, KOM
Dokončeno:	2012
Archivní označ. zprávy:	

Počet stran:	83
Počet příloh:	2
Počet obrázků:	62
Počet tabulek:	1
Počet diagramů:	7

## Prohlášení k využívání výsledků bakalářské práce

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím práce a konzultantem.

V Liberci, dne .....

.....  
podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych zde především poděkoval panu Doc. Ing. Janu Jersákovi, CSc. za vstřícný přístup, užitečné rady a čas, který mi věnoval při tvorbě této bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jaroslavu Votočkovi, Prof. Ing. Alexeyi Popovi a Ing. Jiřímu Karáskovi za podporu, rady a cennou pomoc při řešení a provádění měření v laboratořích katedry Obrábění a montáže. Také bych rád poděkoval panu Ing. Miloši Hernychovi za pomoc při tvorbě programu v PLC.

V poslední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, která mě podporovala v průběhu celého mého studia.

# Obsah

<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>9</b>
<b>Úvod.....</b>	<b>12</b>
<b>1. Podstata procesu vrtání .....</b>	<b>14</b>
1.1 Obecná charakteristika .....	14
1.2 Druhy vrtaček .....	14
1.3 Druhy vrtáků .....	14
1.4 Řezné podmínky.....	15
1.5 Dosahovaná přesnost a drsnost povrchu.....	16
1.6 Práce na vrtačkách .....	16
1.7 Řezné síly při vrtání .....	17
<b>2. Měření sil při obrábění .....</b>	<b>19</b>
2.1 Určování složek řezné síly.....	19
2.1.1 Přímé měření sil .....	19
2.1.1.1 Dynamometr.....	19
2.1.1.2 Druhy snímačů .....	21
2.1.2 Nepřímé měření sil .....	22
<b>3. Programovatelné automaty pro řízení technologických procesů .....</b>	<b>23</b>
3.1 Programovatelný automat PLC.....	23
3.2 Způsoby řízení.....	24
3.3 Rozdíl mezi PLC a PC .....	26
3.4 Vnitřní struktura .....	26
3.5 Volba konfigurace.....	28
3.6 Rozdělení PLC .....	29
3.6.1 Mikro PLC.....	29
3.6.2 Kompaktní PLC .....	29
3.6.3 Modulární PLC.....	30
3.6.4 Soft PLC.....	31
3.6.5 Inteligentní operátorský panel.....	31
3.7 Programování PLC - soubor instrukcí PLC .....	31
3.8 Vykonávání programu.....	32
3.9 Programovací jazyky .....	33
3.9.1 Jazyk mnemokódů.....	33
3.9.2 Jazyk kontaktních (reléových) schémat .....	34
3.9.3 Jazyk logických schémat .....	34
3.9.4 Jazyk strukturovaného textu .....	34
3.9.5 Sekvenční funkční diagram SFC.....	35
<b>4. Použitá zařízení.....</b>	<b>36</b>
4.1 Radiální vrtačka VR 4 .....	36
4.2 PLC Siemens LOGO! 0BA5.....	37
4.3 Tenzometrický dynamometr.....	37
4.4 Můstek M1000 .....	38
4.5 Měřicí karta ADC1216 .....	39

4.6	Program INMES .....	40
4.7	Nástrojová lupa Brinell.....	40
4.8	Drsnoměr Mitutoyo SV 2000.....	41
4.9	Digitální třídotekový dutinoměř Mitutoyo Absolute Borematic.....	42
<b>5.</b>	<b>Metodika měření .....</b>	<b>43</b>
5.1	Sledované procesní veličiny .....	43
5.2	Materiál vzorků a vrtáků.....	43
5.3	Příprava vzorků, upnutí vzorků a vrtáků.....	44
5.4	Ovládání radiální vrtačky VR 4 .....	45
5.5	Volba řezných podmínek .....	47
5.6	Kalibrace tenzometrického dynamometru .....	49
5.6.1	Kalibrace dynamometru na krouticí moment.....	50
5.6.2	Kalibrace dynamometru na posuvovou sílu .....	51
5.7	Schéma zapojení použitého zařízení .....	52
5.8	Příprava měřicího zařízení.....	52
5.9	Postup měření .....	53
5.9.1	Jakost povrchu obrobené plochy .....	55
<b>6.</b>	<b>Vyhodnocení měření .....</b>	<b>58</b>
6.1	Postup vyhodnocení měření .....	58
6.2	Výsledky experimentu.....	58
6.2.1	Ukončení experimentu.....	64
6.2.2	Tvar odebrané třísky.....	64
6.2.3	Grafy popisující změnu hodnot sledovaných parametrů v průběhu experimentu.....	65
<b>7.</b>	<b>Programování PLC .....</b>	<b>69</b>
7.1	Zvolení řídicí veličiny pro PLC program a stanovení mezních stavů pro obráběcí proces vrtání.....	69
7.2	Převod fyzikálních veličin na velikost napětí .....	69
7.3	Vytvoření a simulace programu pomocí softwaru Logo! Soft Comfort V6.0....	70
7.4	Postup ručního naprogramování PLC Siemens LOGO! 0BA5 .....	73
<b>8.</b>	<b>Praktické ověření systému řízení .....</b>	<b>77</b>
8.1	Připojení PLC k tenzometrické aparatuře.....	77
8.2	Praktické ověření PLC .....	78
	<b>Závěr.....</b>	<b>79</b>
	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>80</b>
	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>83</b>

## Seznam použitých zkratk a symbolů

$v_c$	[m.min <sup>-1</sup> ]	řezná rychlost
$\pi$		matematická konstanta "pi" (= 3,1415926535897932384)
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky vřetene
$f$	[mm.ot <sup>-1</sup> ]	posuv vrtáku
$D$	[mm]	průměr nástroje
$F_c, F_c'$	[N]	tangenciální složky řezné síly
$F_p, F_p'$	[N]	radiální složky řezné síly
$F_f, F_f'$	[N]	posuvové (axiální) složky řezné síly
$F_o$	[N]	osová síla
$M_k$	[Nm]	krouticí moment
$d_o$	[mm]	průměr jádra vrtáku
$R$	[Ω]	ohmický odpor
$l$	[m]	délka vodiče
$S$	[m]	průřez vodiče
$\rho$	[Ω.m]	měrný odpor
$Q1$	[V]	výstup z PLC pro zcela vyhovující stav
$Q2$	[V]	výstup z PLC pro uspokojivý stav
$Q3$	[V]	výstup z PLC pro nevyhovující stav
$R_a$	[μm]	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
$R_z$	[μm]	největší výška profilu v rozsahu základní délky
$R_t$	[μm]	celková výška profilu v rozsahu vyhodnocované délky
$VB_H$	[mm]	velikost otupení na hlavním ostří
$VB_P$	[mm]	velikost otupení na příčném ostří
$VL_V$	[mm]	velikost „otupení“ na vedlejším ostří
$C_{Fc}, C_{Ff}$		konstanta určena druhem, vlastnostmi materiálu a geometrií nástroje
$x^{Fc}, y^{Fc}, x^{Ff}, y^{Ff}$		exponenty určeny řeznými podmínkami, materiálem a nástrojem
IT		stupeň přesnosti
PLC		programovatelný logický automat (Programmable Logic Controller)
PAC		programovatelné automaty (Programmable Automation Controller)

SPS	programovatelné automaty (Speicherprogrammlebare Steuerung)
D/A	digitálně analogový
A/D	analogovo digitální
AI	analogový vstup (analog input)
AO	analogový výstup (analog output)
DI	digitální vstup (digital input)
DO	digitální výstup (digital output)
CPU	centrální jednotka (Central Procesor Unit)
I/O	jednotka řízení vstupů a výstupů
RAM	operační paměť s možností čtení i zápisu (Random - Access Memory)
ROM	paměť pouze pro čtení (Read - Only Memory)
SPEC	speciální funkce
COM	komunikace (communication)
PC	osobní počítač (Personal computer)
IPC	průmyslový osobní počítač (Industrial Personal Computer)
LCD	displej z tekutých krystalů (Liquid Crystal Display)
IEC	mezinárodní norma
SFC	sekvenční funkční diagram (Sequential Function Chart)
IL	seznam instrukcí (Instruction List)
LD	příčkový diagram (Ladder Diagram)
FBD	funkční blokový diagram (Function Block Diagram)
ST	strukturovaný text (Structured Text)
C	programovací jazyk "C"
VR 4	druh radiální vrtačky
EIB	sběrníkový systém - evropská instalace sběrnice (European Instalation Bus)
LON	sběrníkový systém - (Local Operating Network)
AS-I	sběrníkový systém pro binární akční členy (Actuator Sensor Interface)
UHF	ultra vysoká frekvence (ultra high frequency)
TTL	tranzistorově - tranzistorová logika (transistor - transistor - logic)
FFT	rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transform)
HB	tvrdost podle Brinella
HSS	rychlořezná ocel (High Speed Steel)



GF	základní funkce (general function)
Par	parametr
RS	samodržné relé
SF	speciální funkce (special funktion)
Co	konektor (connector)
KOM	katedra obrábění a montáže

## Úvod

Technologie vrtání je jednou ze základních metod obrábění, která slouží ke zhotovení děr (vnitřních rotačních ploch) zpravidla dvoubřítým nástrojem. S touto metodou obrábění se běžně setkáváme snad v každé firmě zabývající se strojírenskou výrobou.

Pro účelné, produktivní a hospodárné vrtání je potřeba v první řadě vhodně zvolit druh stroje, nástroje a na základě toho zvolit optimální řezné podmínky. Návrh zmíněných parametrů závisí především na požadavcích, které jsou kladeny na konečné vlastnosti obrobku. V dnešní době se průmysl snaží za účelem většího zisku omezit lidskou pracovní sílu a nahradit ji silou strojní. K tomu je zapotřebí automatizace výroby. Abychom ji mohli zavést, je potřeba sledovat proces v reálném čase a zachytit každou odchylku technologických parametrů, která by vedla ke zhoršení finálních vlastností výrobku.

Cílem této bakalářské práce je vytvořit systém řízení obráběcího procesu vrtání pomocí vhodně vytvořeného programu v PLC zařízení, jehož směřodátnou veličinou je krouticí moment a posuvová síla měřená pomocí tenzometrického dynamometru. Přičemž hlavním sledovaným parametrem je velikost opotřebení břitu vrtáku.

Postup pro vypracování bakalářské práce:

- realizace vzorového experimentu vrtání,
- získání dat o průběhu posuvových sil a krouticích momentů v závislosti na čase,
- stanovení mezních kritérií,
- návrh algoritmu zpracování dat charakterizujících průběh posuvové síly a krouticího momentu,
- návrh systému řízení obráběcího procesu vrtání,
- praktické ověření systému řízení.

Bakalářská práce navazuje na bakalářskou práci Dušana Frýdy, která se zabývala návrhem řídicího systému pro proces frézování. Dále na diplomovou práci Radka Matyáše, která se zabývala návrhem řídicího systému pro proces broušení. Poznatky z bakalářské a diplomové práce jsou zde aplikovány na obráběcí proces vrtání. Jako parametry sloužící k určení omezujících kritérií jsou uplatňovány velikosti krouticího momentu a posuvové síly vznikající při samotném vrtání a drsnost povrchu vyvrtané díry.

Tato bakalářská práce souvisí s řešením projektu MSM 4674788501 podporovaného MŠMT ČR a její výsledky by měly napomoci optimalizaci procesu obrábění. Předpokládaným výsledkem řešení výzkumného záměru bude návrh systému řízení obráběcího procesu založený na kontinuálním, multifaktoriálním sledování a predikci

limitujících faktorů aplikovatelný pro konstrukci automatizovaných obráběcích systémů [11].

# 1. Podstata procesu vrtání

## 1.1 Obecná charakteristika

Vrtání je historicky jednou z nejrozšířenějších a nejstarších výrobních metod. Slouží ke zhotovení nebo zvětšení již předvrtaných děr kruhového průřezu [1]. Vrtání je způsob obrábění, při kterém se materiál obrobku (vnitřní rotační plocha) odebírá nástrojem – vrtákem. Hlavní řezný pohyb je rotační a vykonává ho nástroj. Vedlejší pohyb je posuv ve směru osy nástroje a vykonává ho obvykle vrták, jsou však možné i jiné varianty. Přísuv souvisí s poloměrem nástroje. Řezný pohyb se realizuje po šroubovici.

Je to velmi komplexní způsob obrábění vzhledem k rozmanitosti strojů, nástrojů a obrobků. Způsob obrábění a druh nástroje jsou určovány výkresem obrobku s danými požadavky (jakost obrobené plochy, drsnost povrchu, přesnost rozměrů, atd.).

Vrták je nástroj otáčející se kolem pevné osy, který má zpravidla dva břity a každý břit odebírá určité množství materiálu. Tento materiál se odebírá v podobě třísek proměnné tloušťky (krátké třísky nebo spirály). Zvláštností vrtání i dalších, tzv. osových operací (mezi ně patří i vyhrubování, vystružování, zahlubování atd.), je to, že řezná rychlost je na obvodě nástroje nejvyšší a směrem k ose nástroje klesá k nule. Z toho plynou některé technologické problémy. Například břit v ose vrtáku vzhledem k nepříznivé geometrii v podstatě neodebírá třísku, ale materiál pouze plasticky deformuje [1]. Dnešními přednostmi vrtání je vysoký výkon obrábění, dobrá jakost obrobených ploch a přesnost rozměrů.

Problémem při vrtání může být odvod třísky. Toto se stává zejména u vrtání hlubokých děr, kdy tříska zůstává mezi obrobkem a vrtákem. Tomu lze určitými způsoby předejít, například použitím emulze.

## 1.2 Druhy vrtaček

Chceme-li, aby byl obrobek podle výrobního postupu dobře vrtán, musíme správně zvolit stroj. Vrtačky jsou stroje, které se obvykle používají k vrtání, vyhrubování, vystružování a řezání závitů. Nástroj je upnut ve vřetení stroje. Volit můžeme mezi vrtačkou stolní, sloupovou, stojanovou, radiální (otočnou), souřadnicovou, speciální (víceřetenovou, atd.) vrtačkou, NC vrtačkou nebo CNC vrtačkou (obráběcím centrem) [1], [2].

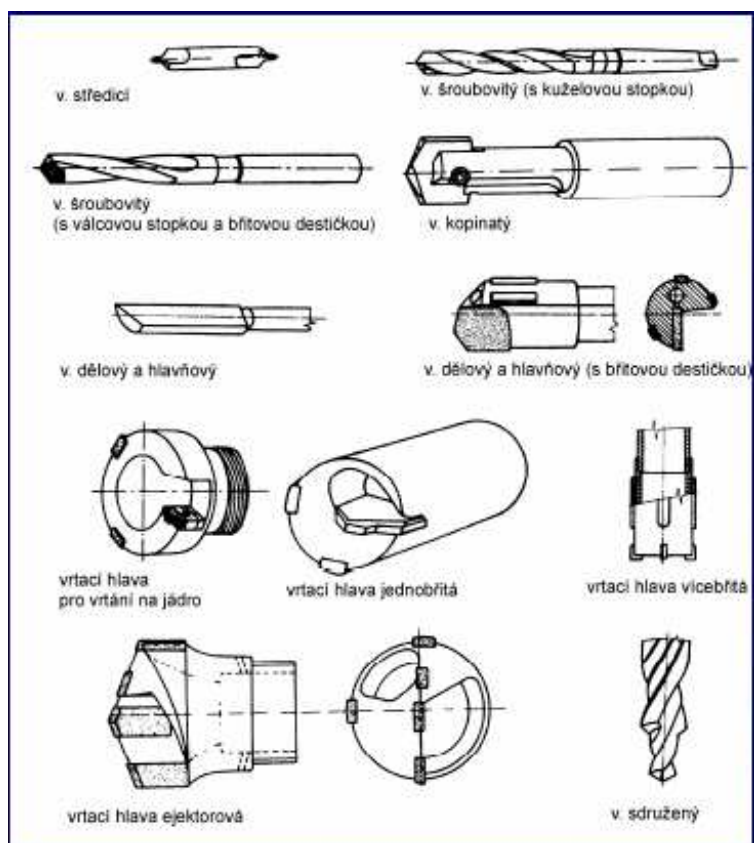
## 1.3 Druhy vrtáků

Nástroje na vrtání – vrtáky (obr. 1) – se podle tvaru dělí na kopinaté (ploché),

šroubovitě, středící (navrtáváky), dělové (hrot neleží v ose), sdružené vrtáky (více průměrů na vrtáku), vrtací hlavy a vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami [1]. Vrtáky jsou zpravidla dvoubřité nástroje, které mají břity uspořádány na válcové ploše.

Vrtáky lze rozdělit do jednotlivých skupin z různých hledisek [2]:

- dle tvaru zubů – zuby frézované nebo podsoustružené,
- dle nástrojového materiálu břitu – z nástrojové oceli, rychlořezné oceli, slinutých karbidů, řezné keramiky, kubického nitridu bóru a diamantu,
- dle směru zubu vzhledem k ose rotace vrtáku – pravé, levé,
- dle konstrukčního uspořádání – vrtáky celistvé, s vkládanými noži, dělené a sdružené,
- z hlediska způsobu upnutí vrtáků na stroji – nástrčné, se stopkou,
- dle tvaru stopky – s válcovou, s kuželovou stopkou,
- dle úhlu stoupání šroubovice – s velkým, se středním, s malým úhlem stoupání šroubovice.



Obr. 1 Základní druhy vrtáků [2]

#### 1.4 Řezné podmínky

Při vrtání se řezné podmínky pohybují v širokém rozsahu v závislosti na druhu nástroje. Řezné rychlosti jsou v porovnání s frézováním a soustružením nižší vzhledem k nepříznivým podmínkám, za kterých vrták pracuje. Odvod tepla z místa řezu v díře je

špatný a břit je značně tepelně zatížen. Proto se při vrtání používá v naprosté většině případů chlazení procesní kapalinou, obvykle emulzí. Při vrtání hlubokých děr se používá speciálních olejů [1]. Tyto procesní kapaliny mají chladicí a mazací vlastnosti.

Za řeznou rychlost  $v_c$  považujeme obvodovou rychlost nástroje:

$$v_c = (\pi \cdot D \cdot n) / 1000 \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}],$$

kde:

$D$  ... průměr nástroje [mm],

$n$  ... otáčky nástroje [ $\text{min}^{-1}$ ] [1].

### 1.5 Dosahovaná přesnost a drsnost povrchu

Dosahovaná přesnost a jakost obrobené plochy závisí na typu použitého nástroje (tab. 1) [1].

Nástroj	Přesnost rozměrů IT	Drsnost obrobeného povrchu $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]
Šroubovitý vrták	11 až 13	6,3 až 25
Šroubovitý vrták s vodicím pouzdem	10	6,3 až 25
Kopinatý vrták	10	6,3 až 25
Dělový vrták	8	1,6 až 6,3
Vrták s vyměnitelnými břitovými destičkami	8 až 10	3,2 až 12,5

Tab. 1 Druhy vrtáku a jejich dosahovaná přesnost a drsnost povrchu [1]

Při potřebě získání lepších vlastností (jakost, přesnost, drsnost, atd.) obrobené plochy následují po vrtání jiné operace, které tyto požadavky splňují, například vyhrubování, vystružování.

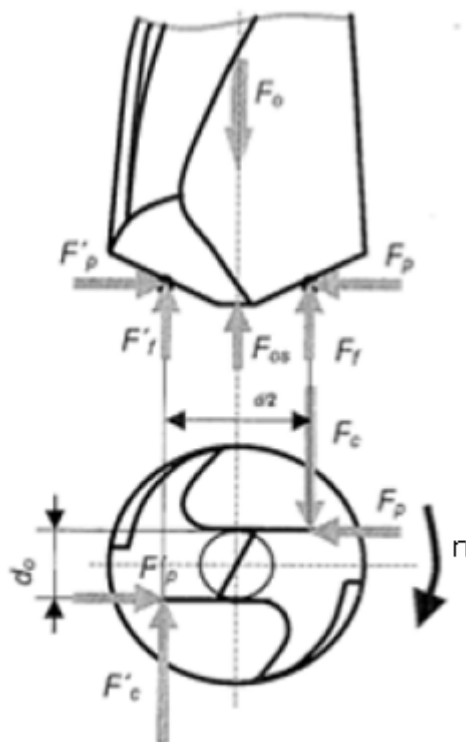
### 1.6 Práce na vrtačkách

Vrtání lze rozdělit do tří způsobů: vrtání do plného materiálu, do předvrtaných děr a na jádro (vyvrtání) – je operace, kdy se aplikuje postupné vrtání. Využívá se hlavně pro větší průměry, jelikož má pak menší požadavky na příkon stroje než u vrtání do plna [2].

Základní práce na vrtačkách jsou vrtání, vyhrubování, vystružování, zahlubování, srážení hran vyvrtávaných děr a řezání závitů (tvarových ploch). Řezání závitů závitníky se na vrtačkách provádí buď přímo s reverzací otáček vřetene, nebo pomocí speciálních závitovacích hlav, které chrání závitník proti překroucení speciální spojkou s nastavením maximálního točivého momentu a mají zrychlující převod pro reverzaci otáčení závitníku bez reverzace otáček vřetene [1].

### 1.7 Řezné síly při vrtání [12]

Odpor materiálu objektu proti odřezávání je překonáván řeznými silami působícími na řezných hranách nástroje. Na řezných hranách vrtáku jsou při vrtání rozloženy řezné síly. Složky řezné síly se soustřeďují v definovaném bodě na řezných hranách šroubovitého vrtáku a rozkládají se do směrů souřadnicového systému  $x, y, z$  (obr. 2).



Obr. 2 Řezné síly při vrtání [3]

Radiální síly  $F_p$  a  $F'_p$  se navzájem ruší, jestliže má šroubovitý vrták symetrické hrany. Řezné síly  $F_c$  a  $F'_c$  působí přibližně na rameni  $d/4$ , kde vytváří krouticí moment  $M_k$ , který se přenáší na vřeteno stroje. Složky řezné síly  $F_f$  a  $F'_f$  se skládají a tvoří osovou sílu  $F_0$ , kterou překonává posunový mechanismus a namáhá vrták na vzpěr. Pro výpočet řezných sil  $F_c$  a  $F_f$  je možné využít empirické vztahy (1), (2). Pro výpočet  $M_k$  z řezných sil platí vztah (3) [3], [4].

$$F_c = C_{Fc} \cdot D^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad (1)$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot D^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad (2)$$

$$M_k = 2F_c \cdot (d/4) - 2F_p \cdot (d_0/2) \quad (3)$$

Kde:

$C_{Fc}, C_{Ff}$  ... konstanta určena vlastnostmi, druhem materiálu  
a geometrií nástroje,

$x^{Fc}, y^{Fc}, x^{Ff}, y^{Ff}$  ... exponenty určeny nástrojem, materiálem a řeznými  
podmínkami.



## 2. Měření sil při obrábění

Z mnoha důvodů potřebujeme v technické praxi určit síly při obrábění. Síly jsou buď časově proměnné nebo časově neproměnné. Časově proměnné síly měříme mechanickými siloměry, kde se využívá převodu síly na mechanickou výchylku (princip deformace pružiny). Časově neproměnné síly lze určovat vážením – porovnáním síly s účinky tíže na příslušnou hmotu.

### 2.1 Určování složek řezné síly

Způsoby určování řezných sil:

- určování řezných sil pomocí měrného řezného odporu,
- určování řezných sil z empirických vzorců,
- na základě analytických vzorců (z rozměru třísky a geometrie nože),
- měření řezných sil při obrábění [12].

Výsledky získané výpočtem ze vzorců jsou pouze přibližné, protože velikost jednotlivých složek řezné síly je ovlivňována řeznými podmínkami. V praxi je nutno tyto výsledky porovnávat s experimentálně zjištěnými výsledky. Při obrábění můžeme řeznou sílu a její složky měřit dvěma způsoby:

- přímým měřením dynamometrem,
- nepřímým měřením sil [5].

#### 2.1.1 Přímé měření sil

##### 2.1.1.1 Dynamometr

Metoda záleží v měření pružných deformací některého vhodného měrného elementu dynamometru, které vznikají při zatížení složkami řezné síly. Z deformací tohoto elementu se po zesílení usuzuje na velikost i směr jednotlivých složek řezné síly. Řezné síly můžeme vhodnými prostředky sledovat nejen staticky, ale i dynamicky znázorňovat jejich průběh oscilografy [12]. Principy měření deformací zatěžovaného elementu dynamometru mohou být hydraulické, mechanické, kapacitní, optické, elektrické, atd.

Dynamometry rozlišujeme podle druhu operací, pro které jsou použity (dynamometry pro soustružení, vrtání, frézování, broušení atd.) [6].

Dynamometry dělíme podle počtu složek řezných sil, které současně měříme, na dynamometry jednosložkové, dvousložkové a třísložkové. Obvykle jimi měříme krouticí moment.

Pomocí vhodně zvolených deformačních členů se zachycují síly, které má dynamometr měřit. Působením těchto sil se pak tyto deformační členy přímo úměrně deformují a tyto deformace se převádí opět vhodně zvolenými snímači na signál, který zpracovává dále přijímač a ve vhodné formě ho vyčísluje na zobrazovacím zařízení [12].

Deformační členy se konstruují pro každé řešení jinak a standardizované tvary mohou většinou pouze pomoci v řešení. Pro přijímače a snímače se dají použít standardizované sériově vyráběné součásti jako polovodičové a kovové (fóliové, drátkové, vrstevné) tenzometry. Aplikace tenzometrů v deformačních členech zachycujících tlaky, krouticí momenty nebo statické síly, jsou v porovnání s jinými principy měření mechanických veličin nejpřesnější [12]. U některých typů snímačů lze dosáhnout přesnosti až 0,04%.

Požadavky na aparaturu k měření řezných sil jsou [12]:

- tuhost - nutná k zachování řezných podmínek,
- malá setrvačnost - je důležitá k tomu, aby jim bylo možno měřit síly, které kolísají v rychlém sledu za sebou,
- stabilita cejchování,
- citlivost - ovlivňuje minimální zachycenou změnu měřené složky řezné síly,
- přesnost,
- dostatečný měřicí rozsah - ovlivněna univerzálnost dynamometru,
- minimální ovlivňování složek navzájem,
- spolehlivost,
- jednoduchá obsluha,
- minimální rozměry a hmotnost.

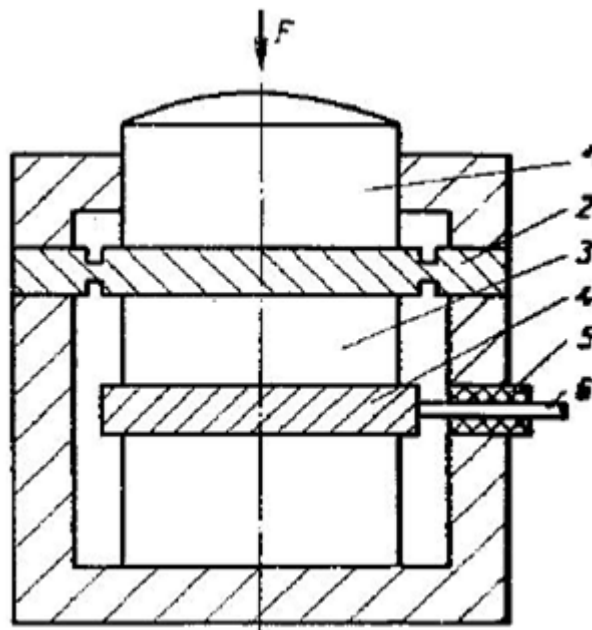
Dynamometr se většinou skládá z těchto tří základních částí:

- 1) pružný článek (čidlo) – vlivem síly (vnějšího zatížení) se pružně deformuje, přemísťuje atd.
- 2) snímač – mění mechanickou změnu pružného článku na hodnotu tlakovou nebo elektrickou
- 3) přijímač – přijímá a zpracovává signál snímače, zesiluje jej a popřípadě jeho velikost zaznamenává

### 2.1.1.2 Druhy snímačů

Rozeznáváme dva druhy zařízení, dynamometr s pasivním a s aktivním snímačem sil. Liší se podle toho, zda ke své funkci potřebují nebo nepotřebují zdroj energie:

- Snímač aktivní (generátorový): je to snímač, jehož výstupní veličina je elektrický proud, napětí nebo veličina, již lze po případném zesílení měřit. Zde můžeme zařadit:
  - dynamometry piezoelektrické (obr. 3) - pracují na principu deformace piezoelektrického členu, kdy na jeho elektrodách vzniká náboj úměrný působící síle [13]. Používají se při měření sil při obrábění s úběrem třísek menšího průřezu, např. u broušení,



Legenda: 1 – přenosový prvek, 2 – membrána, 3 – piezoelektrický prvek,  
4 – elektroda, 5 – izolace, 6 – přívod

Obr. 3 Piezoelektrický snímač sil [5]

- dynamometry mechanické - zde se používá pružného članku a snímače úchylkoměru, pružné membrány, cejchované pružiny nebo pákového ústrojí,
- dynamometry hydraulické - se využívá nestlačitelnosti kapalin,
- dynamometry pneumatické - používá k měření sil siloměrných tělísek [12],
- dynamometry magnetické - princip je založen na stanovení změn magnetických veličin (impedance, vlastní nebo vzájemné indukčnosti) vyvolaných deformacemi feromagnetických materiálů.

- Snímač pasivní (parametrický): je to snímač, který mění měřenou veličinu na jinou elektrickou veličinu, která je potom parametrem elektrického obvodu. Řadí se sem [12]:
  - dynamometr odporový:
    - a) snímače s kontaktním odporem
    - b) snímače drátkové (tenzometry)
  - dynamometr indukčnostní:
    - a) snímač s malou vzduchovou mezerou
    - b) snímač transformátorový [5].

### 2.1.2 Nepřímé měření sil

Toto měření je méně přesné než přímé měření sil na dynamometrech, ale pro běžná měření v praxi nám to většinou vyhovuje.

Střední hodnoty řezné síly určíme změřením výkonu motoru stroje nebo krouticího momentu na vřetení obráběcího stroje. Z těchto hodnot vypočítáme hlavní složku řezné síly [12].

- určování řezné síly pomocí brzdy s dynamometrem,
- měření výkonu zatížení obráběcího stroje wattmetrem [5].

### 3. Programovatelné automaty (PLC) pro řízení technologických procesů

Moderní PLC se začaly objevovat v šedesátých letech minulého století, přičemž v následujících desetiletích se jejich obecné funkce včetně signálových tras takřka neměnily. To se však změnilo s novými a také mnohem tvrdšími požadavky na řízení procesů, které přineslo století dvacátéprvní, zejména pak díky vyšším výkonům, menším fyzickým rozměrům a také větší flexibilitou v otázce nabízených funkcí [14]. Všeobecně PLC tvoří páteř řídicích systémů průmyslové automatizace po dobu více než 20 let. Je to dáno především jejich jednoduchostí, vysokou spolehlivostí a tradicí [7]. Společně s mikrokontrolery patří PLC k nejprogresivnějším prvkům současné automatizační techniky [15].

Na našem trhu je možno se nejčastěji setkat s programovatelnými automaty těchto nejvýznamnějších světových výrobců: ABB, Allen – Bradley, B+R, Eberle, Festo, GE, H+B, Idec, Klöckner Moeller, Matsushita, Mitsubishi, Omron, Saia, Siemens, Schneider Group a českého výrobce Teco [8].

#### 3.1 Programovatelný automat PLC

Nejčastěji se označuje zkratkou PLC (Programmable Logic Controller) [8], jindy také *programovatelné logické automaty*, resp. výstižněji jen *programovatelné automaty* - Programmable Automation Controller (PAC) [14]. V německé literatuře se lze setkat se zkratkou SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) [8]. PLC vypadá jako relativně malý průmyslový počítač, který slouží k řízení různých aplikací (strojů, výrobních procesů, atd.) v reálném čase.

Programovatelný automat je uživatelsky programovatelný řídicí systém přizpůsobený pro řízení průmyslových a technologických procesů, mnohdy specializovaný na úlohy převážně logického typu (obzvláště u starších typů nebo u nejmenších systémů) [8]. Jejich pole působnosti přitom zahrnuje celou řadu aplikací, od jednoduchého osvětlení až po stěžejní systémy v chemických výrobních závodech. Takové sestavy pak mohou nabídnout nejrůznější funkce, zajistit různé druhy analogových nebo také číslicových vstupně – výstupních rozhraní, zpracování signálu, datovou konverzi nebo rozmanité komunikační protokoly. Veškeré součásti a také funkce PLC se přitom soustřeďují okolo kontroléru, naprogramovaného pro vykonávání přesně stanovených úkolů [14].

Hlavní předností PLC je možnost rychlé realizace systému. Technické vybavení nemusí uživatel vyvíjet. Stačí navrhnout a včas objednat vhodnou sestavu modulů programovatelného automatu (konfiguraci) pro danou aplikaci, vytvořit projekt, napsat a

odladit uživatelský program, pak vše realizovat a uvést do chodu [8].

Technické vybavení programovatelných automatů je navrženo tak, že jsou extrémně spolehlivé i v drsných průmyslových podmínkách, jsou odolné proti rušení i poruchám, vyznačují se robustností a spolehlivostí. PLC bývají vybaveny i vnitřními diagnostickými funkcemi, které průběžně kontrolují činnost systému a včas zjistí případnou závadu, lokalizují ji, bezpečně ošetří a usnadní její odstranění [8].

V současnosti mají PLC systémy užitečnou a zároveň důležitou vlastnost a to schopnost komunikovat se vzdálenými moduly vstupů/výstupů, se souřadnými i nadřazenými systémy, s podsystémy, s operátorskými panely a s jinými inteligentními přístroji, s počítači a s jejich sítěmi, a tak vytvářet distribuované systémy.

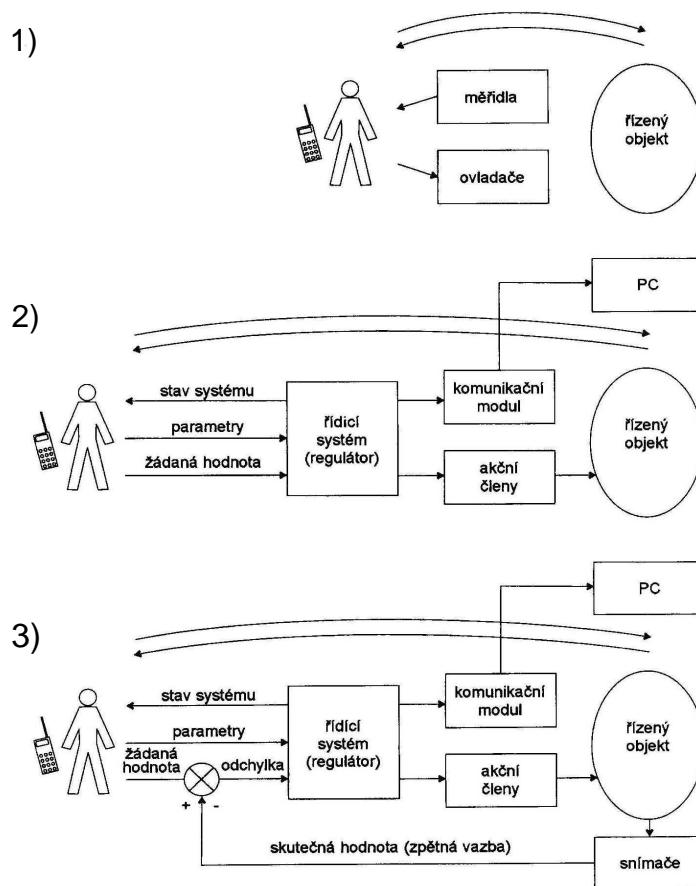
Každá změna u řídicího systému s pevnou logikou (např. s relé) je zdrojem problémů. Aby mohly být splněny odlišné potřeby nejrůznějších provozů, resp. aplikací, musejí být základní PLC moduly dostatečně přizpůsobivé (flexibilní) a také přístupné změně svých parametrů (konfigurovatelné). Vstupní podněty (stimuly), ať již analogové (AI) nebo digitální (DI), přitom získáváme z připojených strojů, snímačů nebo také procesních událostí v napěťové či proudové podobě. Od PLC se rovněž očekává, že bude vstupní podněty pro jednotku CPU (Central Procesor Unit), která následně řídí výstupní systémy i jejich ovládací prvky, interpretovat a konvertovat zcela přesně [14].

### 3.2 Způsoby řízení

Máme tři způsoby začlenění programovatelného automatu do systému řízení [8]: ruční, přímé (dopředné) a zpětnovazební. Všechny jsou schematicky znázorněny na obr. 4.

Při *ručním řízení* vykonává všechny operace člověk. Při *přímém (dopředném) řízení* působí řídicí systém (třeba PLC) na řízený objekt jednosměrně, jen jej ovládá a nekontroluje dosažený stav. Mezi systémem a řízeným objektem jsou zařazeny jen akční členy.

Při *zpětnovazebním řízení* získává řídicí systém zpětnou informaci o stavu řízeného objektu (realizuje zpětnou vazbu, uzavírá zpětnovazebnou smyčku). Porovnává požadovaný stav se skutečným, a podle zjištěné odchylky upravuje své akční zásahy tak, aby dosáhl požadovaného stavu (nebo se mu aspoň co možná co nejvíce přiblížil). Zpětnovazební řízení je typické pro regulační úlohy. Při použití PLC to znamená, že zadání žádné hodnoty je provedeno v číslicové formě, s číselnou informací systém operuje i při zpracování skutečné hodnoty a odchylky, ale i při výpočtech pomocných veličin potřebných k realizaci regulačního algoritmu. Řízený objekt je proto třeba doplnit o potřebné snímače pro měření stavu sledovaných veličin (např. teploty, hladiny, polohy, nebo tlaku).



Obr. 4 Principiální schéma způsobů řízení: 1) ruční, 2) přímé (dopředné), 3) zpětnovazební [8]

Za zpětnovazebné řízení ale můžeme považovat i logické řízení, při kterém na objekt působíme jen dvouhodnotovými povely typu „vypni – zapni“ a zpracováváme i zpětnovazební informace dvouhodnotového charakteru ve významu hlášení o vykonávání povelu nebo překročení povolených hodnot (např. informace typu: „hladina nízká“, „hladina překročena“, atd.) [8].

Pro oba případy (přímé, zpětnovazební) je navíc naznačena komunikační vazba řídicího systému k nadřazenému počítačovému systému (např. pro monitorování procesu). Ponechaná je i účast člověka na řízení procesu, protože i v automatizovaných procesech bývá jeho přítomnost (alespoň občasná, pro kontrolu a seřízení) nezbytná [8]. Na obr. 4 jsme člověka vybavili komunikačními možnostmi, tedy mobilním telefonem. Ve skutečnosti to může být třeba počítač s přístupem na internet.

Situace na obr. 4 je hrubě zjednodušena. V praxi je běžná kombinace všech tří způsobů řízení. Mnohdy se i při ručním řízení (např. stroje) uplatňuje řídicí systém, nejčastěji PLC. Obvykle je nezbytný už jen k obsluze, ke komunikaci s operátorským panelem, ke zpracování povelů operátora, k vyhodnocení stavů stroje a k jejich zobrazení, jako prostředník mezi povely operátora a mezi jednotlivými akcemi pro řízení stro-

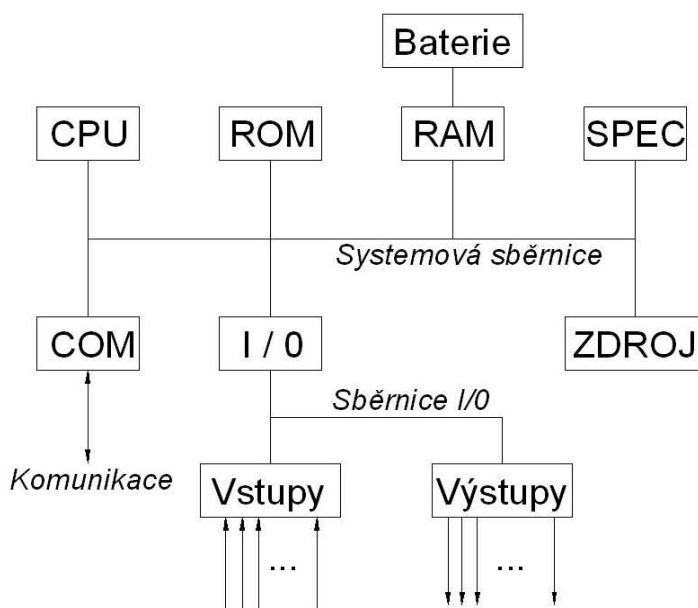
je, pro měření a zpracování měřené informace, pro logické ochrany stroje atd. Mnohdy je při řízení stroje nutné zajistit jejich koordinaci povelů pro pohony s jinými akčními zásahy, jejich kontrolu apod. [8].

### 3.3 Rozdíl mezi PLC a PC [15].

- a) *typ řešených úloh* – PLC se používá pro řízení technologických procesů
- b) *periferie* - u PLC jsou nejčastější periferie binárního typu a tomu odpovídá i instrukční soubor
- c) *umístění* – PLC je umístěn přímo u řízeného stroje (v provozu)
- d) *požadavky na prostředí* – vyplývají z umístění – prach, vlhkost, teplota, otřesy, elektromagnetické pole od silových akčních členů, výbušné prostředí
- e) *spolehlivost* – výrazně vyšší nároky na spolehlivost hardware i software vzhledem k možnému rozsahu škod způsobenému chybou řídicího systému. Střední doba mezi dvěma poruchami bývá řádově 104 až 105 hodin
- f) *architektura* – PLC mívají více I/O (jednotka řízení vstupů a výstupů) sběrnic, hardware koncepte
- g) *programování* – využívá se i absolutní adresace, grafické programovací jazyky
- h) *cyklická činnost* – scan

### 3.4 Vnitřní struktura PLC [7]

Tři funkční bloky v principu tvoří základ PLC, jsou to: zpracování informace, vstupy/výstupy a paměť. Všechny ostatní bloky bereme jako podpůrné a doplňkové.



Obr. 5 Bloková struktura programovatelného automatu [7]



Bloky, které jsou uvedeny na obr. 5, mají následující funkci:

- I/O (jednotka řízení vstupů a výstupů) snímá hodnoty vstupních veličin z procesu, konvertuje je do číslíkové formy a ukládá do operační paměti,
- CPU (centrální jednotka) zpracovává informace, tj. podle programu čte z operační paměti hodnoty vstupních a pomocných proměnných, provádí s nimi logické (případně i numerické) operace a výsledky ukládá do operační paměti,
- RAM (operační paměť s možností čtení i zápisu) slouží k ukládání řídicího programu a hodnot vstupních, výstupních a pomocných proměnných,
- ROM (paměť pouze pro čtení) obsahuje systémové programy pro činnost automatu, které uživatel nemůže modifikovat,
- SPEC (speciální funkce) obsahuje modul hodin, časovače, čítače, sekvenční registry a případně algoritmy pro regulace, matematické funkce apod., je-li jimi automat vybaven,
- COM (komunikace) zajišťuje komunikaci automatu s okolím po sériové lince nebo po speciální komunikační sběrnici,
- ZDROJ zajišťuje napájení automatu elektrickou energií,
- BATERIE zálohuje obsah operační paměti při výpadku napájení.

Vstupy a výstupy bývají od čidel a ovládacích prvků v technologickém procesu galvanicky odděleny, aby se při průrazu síťového napětí při poškození čidla, pohonu nebo kabelu nezničil i automat. Vstupy jsou navíc osazeny tvarovacím filtrem, který odstraňuje nežádoucí efekty při nedokonalém spínání elektrických kontaktů snímačů.

Mezi důležité funkčními prvky PLC patří:

- časovače - slouží k řízení doby trvání operací, jednak v řízeném procesu, jednak v řídicím programu (např. čekání na signál z procesu); časovače mají nastavitelný čas běhu, jsou spouštěny a zastavovány binárním signálem a po proběhnutí nastaveného času dávají na výstupu též binární signál, takže se velice dobře dají zařazovat do kombinační i sekvenční logiky,
- čítače - slouží k počítání vstupních pulsů nebo k vysílání určeného počtu pulsů na výstup; počet pulsů je předvolitelný. Čítače jsou ovládány binárními signály a jejich výstupy jsou rovněž binární signály, takže mohou být také snadno zařazovány do struktur logického řízení,
- sekvenční registry (nebo se jim také říká posuvné registry) - jsou to posloupnosti bitů, ve kterých je každý bit samostatně adresovatelný, tj. můžeme se na něj v programu odkazovat. Vložení nové informace (logické 0 nebo 1) na vstup sekvenčního registru způsobí, že se tato informace umístí do 1. bitu a obsah všech

ostatních bitů se posune o jednu směrem ke konci registru (poslední údaj se ztrácí); tím je možno určitou informaci posunovat a po určeném počtu kroků ji zase vyjmout a zpracovat.

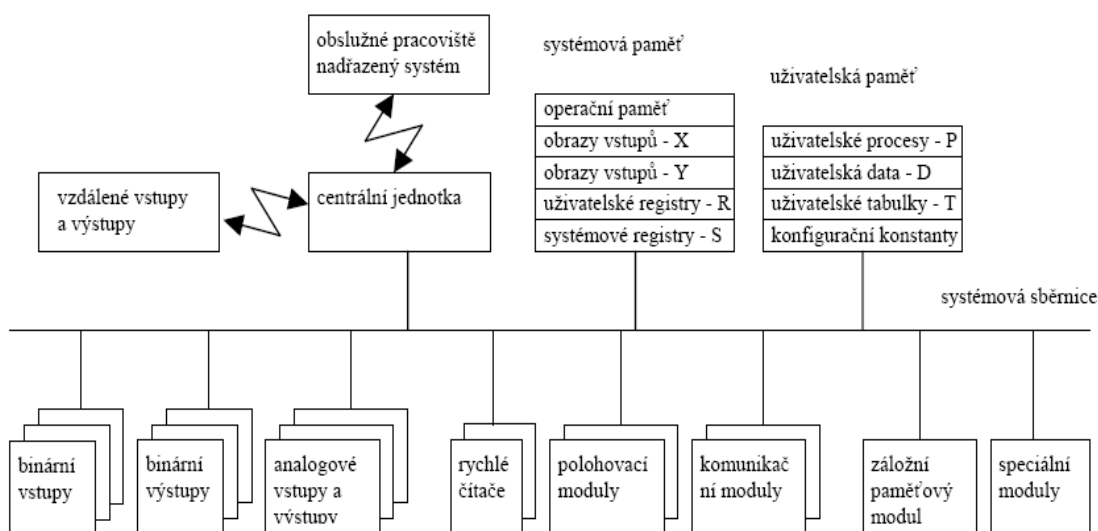
### 3.5 Volba konfigurace [8]

Typický programovatelný automat, jehož blokové schéma struktury je uvedeno na obr. 6, je třeba chápat jen jako možnou konfiguraci pro náročnou aplikaci. Ve skutečnosti navrhuje uživatel sestavu tak, aby co nejlépe přizpůsobil svůj PLC požadavkům řešené úlohy. V konkrétním případě mohou některé typy modulů chybět, jiné se mnohonásobně opakovat. V krajním případě může být PLC vystavěn jako čistě binární (logický) systém, s výhradním použitím dvouhodnotových vstupů a výstupů, nebo naopak jako výhradně analogový (regulátor, měřicí nebo monitorovací systém).

Mohou být zdůvodněné i sestavy čistě vstupní, kdy je PLC degradován na systém pro měření a předzpracování dat. PLC může například vyhodnocovat soubor analogových a binárních snímačů z monitorované technologie, analyzovat je nebo předávat nadřazenému PC. Může se specializovat jen na čítání impulzů z impulzních průtokoměrů plynu, teplé a studené vody nebo z měřičů spotřebovaného tepla.

Obdobně může být PLC v roli čistě výstupního systému, například jako ovladač svítících nebo padáčkových segmentových zobrazovačů, jako ovladač souboru pohonů nebo souboru elektrických spotřebičů a jiných akčních členů.

Existují i aplikace PLC bez fyzických vstupů a výstupů, kdy PLC funguje jen jako inteligentní a programovatelný komunikační adaptér pro připojení „cizího systému“ do sítě PLC, pro připojení operátorských panelů, snímačů čárového kódu a jiných identifikačních prvků, jako inteligentní převodník komunikačních rozhraní a adaptér mezi protokoly různých průmyslových sběrnic.



Obr. 6 Blokové schéma vnitřní struktury programovatelného automatu [8]

### 3.6 Rozdělení PLC

Programovatelné automaty lze popsat z hlediska konstrukce (velikosti) do několika skupin:

- mikro PLC,
- kompaktní PLC (obvykle menší systémy),
- modulární PLC (větší systémy – stavebnice),
- soft PLC,
- inteligentní operátorský panel.

Obecně však můžeme říci, že všechny budou plnit podobné, stěžejní funkce zahrnující [14]: analogové vstupy (AI), analogové výstupy (AO), distribuované řízení (např. Fieldbus), digitální vstupy (DI) / výstupy (DO), CPU (Central Procesor Unit), oddělené napájení (Power), resp. také uživatelské rozhraní. Samostatnou kapitolu pak tvoří čidla a jejich podpora.

#### 3.6.1 Mikro PLC [8]

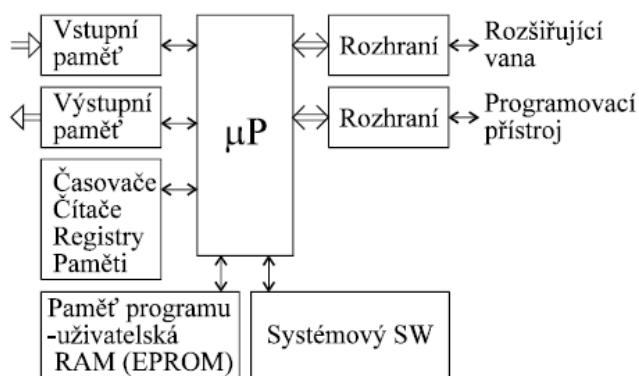
Nejjednodušší, nejmenší a nejlevnější kompaktní PLC systémy (mikro PLC) nabízejí uživateli pevnou sestavu vstupů a výstupů, obvykle jen binárních, například 6 binárních vstupů/6 binárních výstupů pro nejmenší systém - používají se jako náhrada pevné logiky. Uživatel se v tomto případě může rozhodnout pro jeden typ systému, který již nemůže dodatečně rozšiřovat. Svým kompaktním provedením, malými rozměry a nízkou cenou (v jednotkách tisíc Kč) se mikro PLC řadí do kategorie „spotřebního materiálu“. Jejich funkční a programátorský komfort je obvykle redukován na nezbytné minimum, komunikační možnosti mnohdy chybějí.

Typickým použitím programovatelných automatů nejnižší kategorie (mikro PLC) je realizace logické výbavy jednoduchých strojů a mechanismů, která se tradičně řešila pevnou reléovou logikou. Vezmeme-li v úvahu ceny ovládacích prvků, relé, stykačů, časových relé a časových programátorů, pak je zjevné, že použití mikro PLC je účelné již u nejprostších aplikací, kde nahrazuje „hrst relé“.

#### 3.6.2 Kompaktní PLC (Fixed Hardware Style) [8]

Toto provedení je levné a používá se spíše pro jednodušší aplikace [15]. Ostatní PLC v kompaktním provedení (obr. 7) nabízejí určitou, i když omezenou variabilitu ve volbě konfigurace (rozšiřitelnost kompaktních systémů je omezena). Uživatel může k základnímu modulu připojit jeden nebo několik přídavných modulů z omezeného sortimentu s pevnou kombinací vstupů a výstupů, např. modul s 8 binárními vstupy a 8 binárními výstupy (tranzistorovými nebo reléovými), modul rychlých čítačů, analogový

vstupní nebo výstupní modul, modul regulátoru atd. Některé kompaktní systémy se navíc vyznačují ještě vnitřní modulárností, kdy konfiguraci základního modulu lze sestavit osazením základní desky násuvnými moduly vhodného typu („piggyback“).

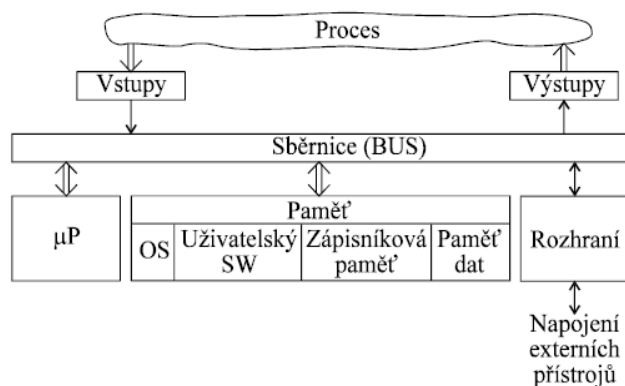


Obr. 7 Blokové schéma velmi malého (kompaktního) PLC [7]

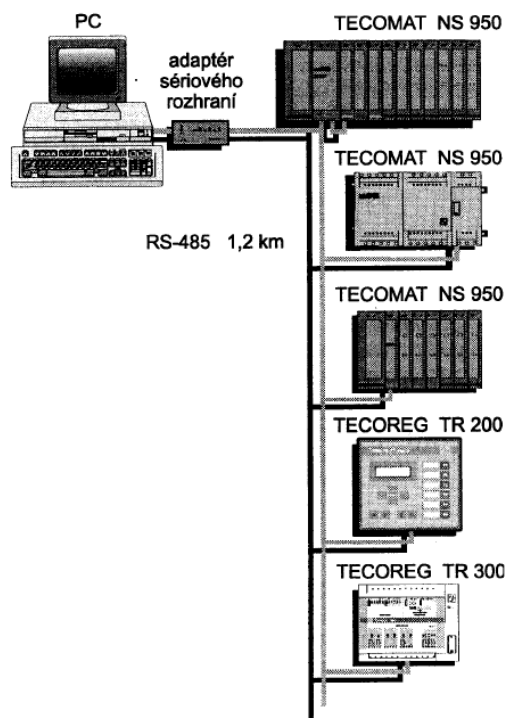
### 3.6.3 Modulární PLC (Modular Hardware Style) [8]

Je vhodné pro náročnější aplikace [15]. Modulární systém (obr. 8) je možno více rozšiřovat (s ohledem na limity výstavby systému), a to v nepoměrně větším rozsahu (větší volnost ve volbě konfigurace) než u kompaktních systémů. V Modulárním systému jsou jednotlivé komponenty celku rozděleny do modulů. PLC se pak skládá z modulů zdroje, CPU, vstupů/výstupů, funkčních modulů. Do různých variant plochého zadního rámu lze zasouvat libovolné moduly (většinou v počtu 4, 6, 8 a 11 modulů). U některých variant může být jeden systém tvořen několika rámy (základní a rozšiřovací moduly). Rozšiřovací moduly mohou být připojeny na vzdálenosti stovek metrů. Místo rozšiřujících modulů mohou být připojeny podsystémy tvořené kteroukoliv z mnoha variant (MINI, ALFA, apod.). Tak lze vytvářet různě strukturované distribuované systémy – např. podle obr. 9.

Typickým do katalogů PLC od renovovaných výrobců zjistíme, že sortiment jejich modulů je úctyhodný. Bohatá je i nabídka příslušenství: napájecí zdroje, kabely, operátorské panely, apod.



Obr. 8 Blokové schéma standardního modulárního PLC [7]



Obr. 9 Ukázka distribuovaného systému – příklad jedné z možností tříúrovňového vertikálního uspořádání komunikace mezi systémy [8]

### 3.6.4 Soft PLC [15]

Jedná se o PLC integrovaná do průmyslových PC počítačů (Industrial PC = IPC) – používají se PLC koprocesory a speciální software. Vzhledem k požadavkům na spolehlivost a na pracovní prostředí odpovídající nasazení v technologickém procesu nelze použít klasický PC počítač, ale počítač IPC. Toto řešení je velmi drahé, ale i tak dojde občas k problémům s během softwaru pod Windows. Proto se používá jen výjimečně pro náročné řízení rozsáhlých procesů, náročné výpočetní algoritmy, zpracování a archivace velkých objemů.

### 3.6.5 Inteligentní operátorský panel

Opět se jedná o kompaktní PLC tentokrát se zabudovaným operátorským panelem. Ten slouží k obousměrné komunikaci s operátorem (má LCD displej a funkční tlačítka) [15]. Je otázkou zda tyto výrobky zařadit mezi PLC, mezi operátorské panely nebo zda tvoří samostatnou kategorii. Někteří výrobci zavádějí pro odlišení označení „pracovní stanice“, někdy s přívlastkem „inteligentní“ nebo „programovatelná“ [8].

## 3.7 Programování PLC - soubor instrukcí PLC [8]

Protože programovatelné automaty byly původně určeny k realizaci logických úloh a k náhradě pevné logiky, nechybějí v žádném PLC instrukce pro základní logické

operace s bitovými operandy, tudíž sejmутí pravdivostní hodnoty adresovaného bitu, operace logického součtu a součinu, negace, výlučného součtu a jiných kombinačních logických funkcí, instrukce pro realizaci paměťových funkcí a klopných obvodů, pro zápis výsledku a mezivýsledku na adresované místo, ale i instrukce čítačů, časovačů, posuvných registrů, krokových řadičů a jiných funkčních bloků.

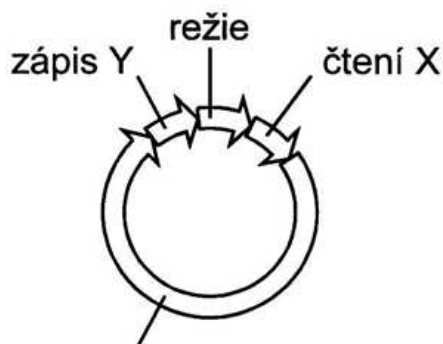
Současné PLC nabízejí instrukční soubor podstatně bohatší. V souboru instrukcí vyspělých PLC obvykle nechybí ani instrukce pro aritmetiku a operace s čísly (někdy jen nejzákladnější, např. sčítání, odčítání a porovnávání, jindy kompletní knihovny pro výpočty s pevnou nebo plovoucí řádovou čárkou), logické instrukce s číselnými operandy (paralelní operace s operandem v délce byte, slova nebo delší) a přenosy dat. Obvyklé jsou instrukce pro organizaci programu (např. skoky v programu, volání podprogramů a návraty).

### **3.8 Vykonávání programu [8]**

Program PLC je posloupnost instrukcí a příkazů jazyka. Typickým režimem jeho aktivace je cyklické vykonávání v programové smyčce. Na rozdíl od jiných programovatelných systémů se programátor PLC nemusí starat o to, aby po konci programu vrátil jeho vykonávání opět na začátek - zajistí to již systémový program. Naopak každé dlouhodobé setrvání programu v programové smyčce je "fatální chybou" a systém jej hlásí jako "překročení doby cyklu".

Cyklické vykonávání programu je schematicky znázorněno na obr. 10. Vždy po vykonání poslední instrukce uživatelského programu (např. E 0) je předáno řízení systémovému programu, který provede tzv. otočku cyklu. V ní nejprve aktualizuje hodnoty výstupů a vstupů: hodnoty uložené dosud v paměti jako obrazy výstupů (registry Y) přepíše do registrů výstupních periferních modulů a hodnoty ze vstupních modulů okopíruje do paměťových obrazů vstupů (registry X). Dále aktualizuje časové údaje pro časovače a systémové registry, ošetří komunikaci a provede ještě řadu režijních úkonů. Po otočce cyklu je opět předáno řízení první instrukci uživatelského programu (např. P 0).

PLC program je vykonáván v cyklu. V jeho režijní části (v otočce cyklu) jsou nejprve na výstupy vyslány aktuálně vyčíslené hodnoty obrazů výstupů Y, pak jsou provedeny režijní operace systému, aktualizace systémových a časových proměnných, naplánována aktivace procesů pro další cyklus, apod.) a na závěr jsou sňaty aktuální hodnoty fyzických vstupů, které jsou pro celý následující cyklus konzervovány, jako obrazy vstupů X.



Obr. 10 Cyklus programu (řešení uživatelského problému) [8]

### 3.9 Programovací jazyky

K programování nabízejí PLC systémy specializované jazyky, původně navržené pro snadnou, názornou a účinnou realizaci logických funkcí. Jazyky systémů různých výrobců jsou podobné, nikoliv však stejné. Přenositelnost programů mezi PLC různých výrobců není možná, daří se to obvykle jen mezi systémy téhož výrobce. Mezinárodní norma IEC 1131-3 sjednocuje programovací jazyky pro PLC [8]. Kodifikuje čtyři základní typy jazyků:

- jazyk mnemokódů,
- jazyk kontaktních (reléových) schémat,
- jazyk logických schémat,
- jazyk strukturovaného textu.

Jako pátý programovací jazyk se často uvádí sekvenční funkční diagram – SFC [16], který je ale spíše zařazován mezi tzv. společné prvky, neboť tvoří jakousi nadstavbu pro strukturování celé aplikace.

Volba programovacího jazyka je závislá na zkušenostech programátora, na typu řešeného problému, na úrovni popisu problému, na struktuře řídicího systému a na řadě dalších okolností. Všechny čtyři základní jazyky jsou vzájemně provázány. Aplikace v nich napsané tvoří určitý základní soubor informací, ke kterému přísluší velký objem technických zkušeností ("know - how"). Vytvářejí vlastně i základní komunikační nástroj pro domluvu odborníků z různých odvětví a oborů [17].

#### 3.9.1 Jazyk mnemokódů (jazyk seznamu instrukcí IL)

IL (Instruction List) patří do skupiny textových jazyků. Bývá označován také jako jazyk pokynů (povelů), seznam instrukcí poněkud připomíná assembler. Programová organizační jednotka je složena ze sekvence instrukcí, z nichž každá začíná na novém řádku, může obsahovat také komentář. Pomocí modifikátorů se vyjadřují negace, podmíněnost a nepodmíněnost instrukce skoků, volání a návratů a priorita [16].

Tento jazyk je poměrně často používán, zejména profesionálními programátory, dovoluje nejlépe přizpůsobit úlohu možnostem PLC a vytěžit maximum z jeho instrukčního souboru [8].

### **3.9.2 Jazyk kontaktních (reléových) schémat (jazyk příčkového diagramu LD)**

LD (Ladder Diagram) patří do skupiny grafických jazyků a je založen na grafické reprezentaci reléové logiky. Program je zapsán sítí propojených grafických prvků. Sít' v jazyku LD je zleva i zprava ohraničena svislými čarami, které se nazývají levá a pravá napájecí sběrnice. Mezi nimi je tzv. příčka, která může být rozvětvena. Každý úsek příčky, vodorovný nebo svislý, může být ve stavu „zapnuto“ nebo „vypnuto“. Do příček mohou být včleněny kontakty (spínací, rozpínací apod.), cívky (cívka, negovaná cívka apod.) a dále funkce a funkční bloky [16].

Tento jazyk je výhodný při programování nejjednodušších logických operací a v případech, kdy s ním pracuje personál, který nezná (a nechce znát) tradiční počítačové programování. Je nezastupitelný při požadavku rychlého servisu [8].

### **3.9.3 Jazyk logických schémat (jazyk funkčního blokového schématu FBD)**

Druhým grafickým jazykem je FBD (Function Block Diagram), který vyjadřuje chování funkcí, funkčních bloků a programů jako soubor vzájemně provázaných grafických bloků podobně jako v elektronických obvodových diagramech. Používají se zde standardní funkční bloky pro vyjádření logických funkcí a také čítače, časovače, komunikační bloky a podle potřeby i speciální bloky. Každý výrobce nabízí ve svém programovacím prostředí poněkud odlišný soubor bloků [16].

Tento jazyk vychází vstříc uživatelům zvyklým na kreslení logických schémat pro zařízení s integrovanými obvody [8].

### **3.9.4 Jazyk strukturovaného textu (ST)**

Textový jazyk ST (Structured Text) je velmi výkonný vyšší programovací jazyk, který má kořeny v programovacích jazycích pro PC (Pascal nebo C). Umožňuje úsporný a názorný zápis algoritmů syntaxe jazyka, je dána povolenými výrazy a příkazy. Je definováno deset typů příkazů (přiřazení, vyvolání funkce, návrat, výběr apod.). Příkazy jsou odděleny středníkem a může jich být více na jednom řádku. Jazyk ST je vhodným nástrojem pro definování komplexních funkčních bloků, které pak mohou být použity v libovolném programovacím jazyce [16], [8].

Jazyk ST je oblíben zejména u mladých absolventů odborných škol, pro které je nejpřirozenější [8].



### 3.9.5 Sekvenční funkční diagram SFC [16]

SFC (Sequential Function Chart) popisuje sekvenční chování řídicího programu. Je odvozen ze symboliky Petriho sítí. SFC umožňuje rozložit úlohu řízení na zvládnutelné části a zachovat přitom přehled o chování celku. Sekvenční funkční diagram se skládá z kroků a přechodů. Každý krok reprezentuje stav řízeného systému a má k sobě přiřazen blok akcí. Přechod je spojen s podmínkami, které musí být splněny, aby mohl být deaktivován krok, který přechodu předchází, a naopak aktivován krok, který následuje. Každý prvek, tzn. přechod i blok akcí, může být naprogramován v libovolném jazyku definovaném v normě, včetně vlastního SFC. Jazyk umožňuje i větvení programu se spojením alternativních větví a paralelní souběh více větví s jejich následnou synchronizací.

## 4. Použitá zařízení

### 4.1 Radiální vrtačka VR 4

Radiální vrtačka VR 4 (obr. 11) je vhodná pro vrtání, vyvrtávání a k řezání závitů při obrábění složitějších obrobků střední velikosti. Uplatňuje se jak v kusové, tak i v sériové výrobě [18]. Vrtačka je vybavena naklápěcím stolem - možno vrtat otvory pod úhlem.

Základní technické údaje radiální vrtačky VR 4 [18]:

- hmotnost stroje 2800 kg
- rozměry stroje 2290x910x2860 mm
- upínací plocha základny 1475x900 mm
- elektromotor vřeteníku 3 kW
- rozsah posuvů 0,025 ÷ 1,58 mm/ot
- otáčky vřetene
  - normální řada 45 ÷ 2000 min<sup>-1</sup>
  - snížená řada 31 ÷ 1400 min<sup>-1</sup>
  - zvýšená řada 63 ÷ 2800 min<sup>-1</sup>
- zdvih vřetene 310 mm
- otáčení ramene okolo sloupu 0 ÷ 360°
- největší průměr vrtání „zplna“
  - v oceli pevnosti 588 MPa 40 mm
  - v šedé litině pevnosti 245 MPa 50 mm



Obr. 11 Radiální vrtačka VR 4

## 4.2 PLC Siemens LOGO! 0BA5 [19, 11]

PLC (obr. 12) je v podstatě malý programovatelný počítač opatřený čtyřřádkovým displejem, díky kterému lze přehledně sestavit velké množství logických obvodů s využitím širokého sortimentu řídicích prvků a hradel.

Základní myšlenkou tohoto modulu je spojit logické, spínací, časové a ostatní speciální funkce do jednoho modulu a tím ušetřit technikům práci při projekci i realizaci celé aplikace. LOGO! dokáže ovládat čerpadla, kompresory, otvírat závory a vrata, zavlažovat rostliny ve skleníku, řídit osvětlení nebo výtahy v budovách a podobné jednoduché úkoly. Je však schopné zvládnout i relativně komplikovaná zařízení včetně sledování teplot, tlaků a ostatních analogových veličin.

LOGO! obsahuje jak základní logické a časové funkce, tak speciální funkce pro pokročilejší uživatele. Může tak zabezpečit funkci několika časových nebo impulzních relé, má čítače, logické funkce, komparátory a mnoho dalších speciálních funkcí např. pro zpracování analogových signálů, pro zobrazení textových zpráv atd. Základní modul LOGO! má integrovaných 8 vstupů a 4 výstupy, přitom dva vstupy mohou být použity jako digitální nebo analogové (0-10 V). Uživatel si přitom může zvolit, zda požaduje tranzistorové výstupy (do 0,3 A) nebo reléové výstupy (do 10 A). V případě, že aplikace vyžaduje více vstupů nebo výstupů, je možné LOGO! rozšířit o další moduly se vstupy a výstupy. Maximální konfigurace je 24 digitálních vstupů, 16 digitálních výstupů, 8 analogových vstupů a nově i 2 analogové výstupy. Speciální rozšiřovací modul umožňuje dokonce přímé připojení odporových teploměrů Pt100 bez žádných dalších převodníků. Existuje i možnost komunikace s více moduly popř. s vyššími řídicími systémy pomocí sběrnice AS-interface, EIB nebo LON.



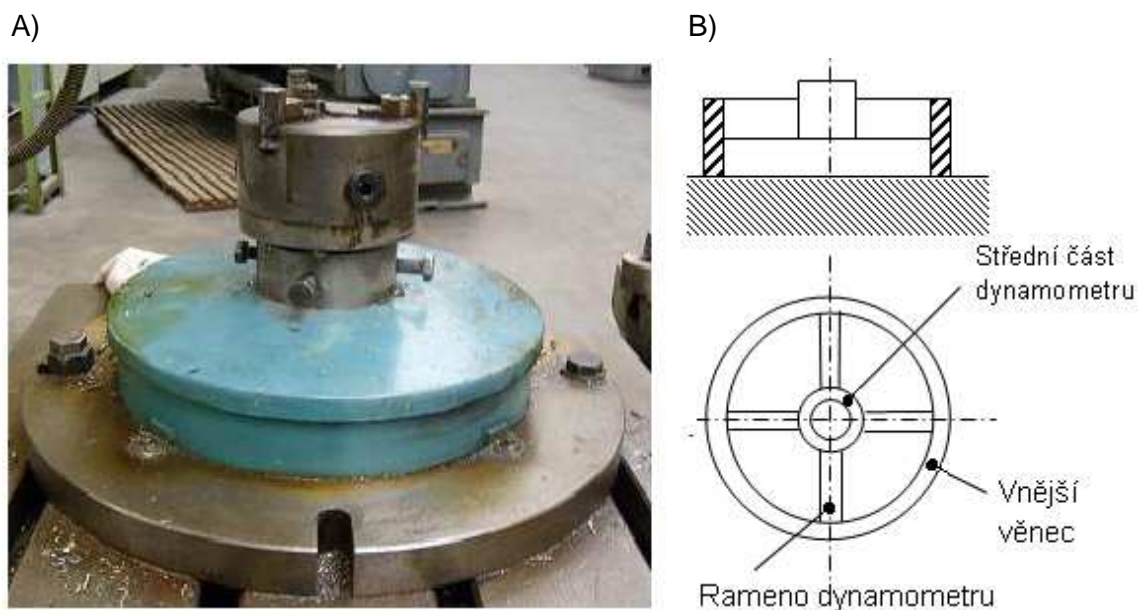
Obr. 12 Ukázka provedení PLC od SIEMENS [19]

## 4.3 Tenzometrický dynamometr

Metodu přímého měření využívá dynamometr s tenzometrickými (odporovými) snímači. Metoda je založena na měření deformací měrných elementů dynamometru,

kteřé vznikají při zatížení složkami řezné síly. Deformaci těchto elementů určíme některými vhodnými metodami a usuzujeme z nich na velikost řezné síly [20]. Tenzometrický snímač vyhodnocuje změnu odporu způsobenou změnou geometrických rozměrů. Představa o funkci snímače vychází ze vztahu pro ohmický odpor  $R$ , vodiče délky  $l$ , průřezu  $S$  a měrného odporu  $\rho$  ve tvaru  $R = \rho \cdot l/S$  [21]. S tenzometrickým dynamometrem, kterým je dílna KOM vybavena, lze měřit krouticí moment a posuvovou sílu při vrtání.

Těleso dynamometru (obr. 13) tvoří vnější věnec, který je pevně spojen se stolem vrtačky. Se střední částí (univerzální sklíčidlo), kde se upíná obrobek, je spojen uvnitř tělesa čtyřmi rameny, která tvoří pružné elementy dynamometru. Celé těleso je vyrobeno z jediného kusu oceli. Na ramenech tělesa jsou nalepeny tenzometry. Na střední části je upevněn kryt pro zamezení vnikání procesní kapaliny a nečistot do dynamometru. Mechanické deformace ramen se převádějí na změnu odporu nalepených tenzometrických snímačů. Můstkovým zapojením se měří změna odporů. Dva můstky typu M1000 jsou připojeny k tenzometrické aparatuře, která signál zpracovává. Na výstupu tenzometrické aparatury je počítač, který zpracovává data a ukazuje na monitoru změřené hodnoty [20].



Obr. 13 A) Tenzometrický dynamometr, B) Schéma dynamometru [20]

#### 4.4 Můstek M1000 [22]

Můstek M1000 (obr. 14) je předzesilovač pro UHF (ultra vysoká frekvence) s vysokým zesílením a velmi malým šumovým číslem. Je velice dobře přizpůsoben pro zpracování velmi slabých přijímaných signálů s malým vstupním ztlumením. Vstupní úroveň umožňuje všestranné nasazení. Je možno současně zesílit velmi slabé kanály

s jinými a přivést je spolu na vysokou výstupní úroveň. Díky odstíněnému pouzdru s F - konektory je M1000 plně chráněn před rušivými signály.



Obr. 14 Můstek M1000 (červeně označen hlavní vypínač)

#### 4.5 Měřicí karta ADC1216 [23]

Karta řady ADC1216 (obr. 15) je univerzální měřicí karta, obsahuje 16 kanálový A/D převodník (používaný jako voltmetr nebo jako pomalý osciloskop) s rozlišením 12 bitů určený pro rozšíření možností počítače řady PC. V jednom počítači lze umístit až 8 karet. Převod analogové hodnoty na digitální je realizován metodou postupné aproximace a je řízen dodávaným programovým modulem (ovladačem karty). Na kartě je dále k dispozici 8 vstupních a 8 výstupních digitálních I/O linek v úrovních TTL/HCT pro univerzální použití. Měřený napěťový rozsah je 0 až 5V nebo -2,5 až 2,5V (lze nastavit). Karty jsou dodávány v několika verzích. ADC1216S obsahuje 16 nesymetrických (SE) vstupních kanálů, ADC1216D je doplněna diferenciálním vstupním zesilovačem s možností změny zisku v rozsahu x1 až x100, případně uživatelsky nastavitelným ziskem v rozsahu x2 až x100. ADC1216A obsahuje ještě navíc D/A převodník s rozlišením 12 bitů a softwarovou konfiguraci adresy karty.



Obr. 15 Měřicí karta ADC1216 [23]



#### 4.6 Program INMES [24]

Program INMES je určen pro komplexní zpracování a analýzu signálu. Pracuje v prostředí DOSu a lokálních sítí. Jako doplňkové funkce obsahuje i modul průběžného ukládání dat na disk a modul únavové životnosti (rainflow). Obsahuje podporu karty ADC1216, karet ADVANTECHA, TEDIAA a dalších.

Základní funkce systému:

- kalibrace pro přepočet napěťových hodnot přímo na fyzikální veličinu,
- grafy signálů a výsledků analýzy s možností funkce ZOOM,
- FFT analýza (amplituda, fáze, výkon, výkonová spektrální hustota, průměrová spektra),
- číslicová filtrace, integrace, derivace, statistika, signálová aritmetika,
- ukládání dat, import a export dat do textových souborů,
- protokoly a konfigurační soubory.

#### 4.7 Nástrojová lupa Brinell

Opotřebení bříty vrtáku bylo měřeno nástrojovou lupou Brinell (obr. 16), která má čtyřicetkrát násobné zvětšení. Lupa má stupnicí, kdy jeden dílek odpovídá 0,05 milimetrům.

Opotřebení bříty vrtáku bylo možno také měřit na univerzálním mikroskopu Carl Zeiss – Jena, kterým je laboratoř KOM vybavena, ale pro urychlení a značné zjednodušení práce byla použita právě nástrojová lupa Brinell.



Obr. 16 Nástrojová lupa Brinell

#### 4.8 Drsnoměr Mitutoyo SV 2000

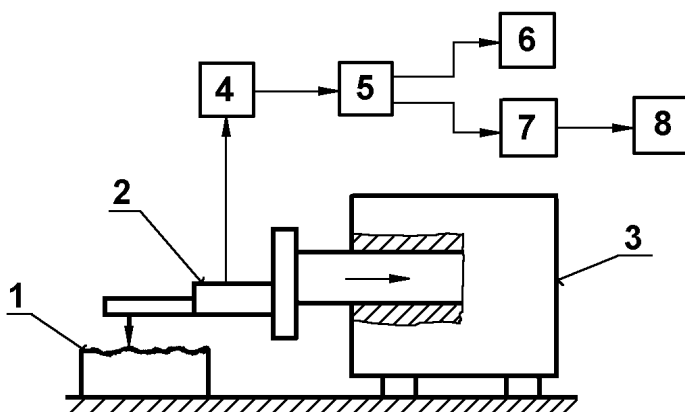
Drsnoměr Mitutoyo SV 2000 (obr. 17) je prakticky orientovaný přístroj pro měrové středisko a laboratoř. Je to zařízení, které je stacionární pro měření od vztažné roviny s vyhraněným profilem. Drsnoměr je dodáván standardně se špičkovým softwarem SURFPAK, umožňuje měřit drsnost, vlnitost a primární profil [27].



Obr. 17 Drsnoměr Mitutoyo SV 2000

(červeně označeno kolečko pro pohyb drsnoměru nahoru a dolů)

Také pracuje na principu dotykové metody (obr. 18). Tento princip patří k nej-používanějším způsobům měření drsnosti povrchu. Dotykový profilometr se skládá z části elektronické a mechanické.



Legenda: 1) měřená součást, 2) snímací hlavice s měřícím hrotem, 3) posuvový mechanismus, 4) zesilovač, 5) filtr, 6) registrační jednotka, 7) jednotka zpracovávající měřící signál, 8) zobrazovací jednotka

Obr. 18 Princip měření dotykovým profilometrem [28]

Mechanická část je tvořena stolem, na němž je upnuta měřená součást. Dále ramenem se snímacím hrotem, který snímá nerovnosti povrchu. Rameno se vždy pohybuje určitou konstantní rychlostí. Přímočarý vratný pohyb je zajištěn pomocí elektromotorku. Elektronická část transformuje mechanický signál generovaný snímacím hrotem na elektrický signál, který se zpracovává buď jako číselná hodnota příslušného parametru drsnosti, nebo jako grafický záznam nerovnosti povrchu [28]. Naměřená data jsou zpracována přímo ve vyhodnocovací části profilometru nebo v našem případě s využitím softwaru SURFPAK v připojeném počítači.

Pracovní rozsah Mitutoyo SV 2000 je v ose „z“ 0 až 800  $\mu\text{m}$  (zdvih) a v ose „x“ 0 až 50 mm (posuv) [27].

#### **4.9 Digitální přesný třídotekový dutinoměr Mitutoyo Absolute Borematic, SBM – 25CST, 568-972-10**

Digitální přesný třídotekový dutinoměr Mitutoyo Absolute Borematic (obr. 19) je určen pro měření dutin v rozsahu 12 až 16 mm. Přesnost měření u tohoto typu přístroje je  $\pm 5 \mu\text{m}$ . Dutinoměr je vybaven třemi výsuvnými měřicími plochami s titanovým povlakem, který slouží pro zvýšení životnosti, kuželem a kontaktním bodem z tvrdokovu [30].



Obr. 19 Digitální přesný třídotekový dutinoměr Mitutoyo Absolute Borematic



## 5. Metodika měření

### 5.1 Sledované procesní veličiny

Cílem experimentu bylo průběžné získávání dat při obráběcím procesu vrtání. Následně tyto data vyhodnotit a navrhnout PLC systém pro řízení obráběcího procesu.

Předpokladem tohoto experimentu bylo, že se během obráběcího procesu budou měnit a pozorovat v závislosti na čase následující parametry:

- otupení vrtáku,
- posuvová síla,
- krouticí moment,
- jakost obrobené plochy.

Během vrtání byla sledována velikost otupení nástroje. Na vrtáku bylo pomocí nástrojové lupy Brinell (obr. 16) pozorováno ostří příčné, hlavní a vedlejší.

### 5.2 Materiál vzorků a vrtáků

Pro experiment byl zvolen vzorek z materiálu 14 220. Jedná se o ušlechtilou, konstrukční mangan – chromovou legovanou ocel, která má tvrdost 170 až 207 HB. Tato ocel je dobře obrobitelná, svařitelná a je vhodná k cementování. Obrobitelnost tohoto materiálu při vrtání je 13b (stejně jako při soustružení a frézování) [25]. Jako vzorek (obr. 20) byla použita kulatina o průměru 107 mm a výšce 110 mm ( $\varnothing 107 \times 110$  mm). Vrtalo se z obou stran vzorku (hloubka díry byla 50 mm).



Obr. 20 Vzorek o rozměrech  $\varnothing 107 \times 110$  mm

Pro tento druh materiálu byl zvolen vrták (obr. 21) o průměru 14,5 mm s kuželovou stopkou ČSN 221140 z rychlořezné oceli HSS. Tento druh vrtáku se běžně používá pro vrtání do legované a nelegované oceli. Lze s ním vrtat i ocelolitiny do

pevnosti 900 N/mm<sup>2</sup>, šedé, temperované i tvárné litiny, spékané oceli, hliníkové slitiny s krátkou třískou, bronz a houževnatou mosaz [1].



Obr. 21 Vrták s kuželovou stopkou ČSN 221140 [1]

### 5.3 Příprava vzorků, upnutí vzorků a vrtáků

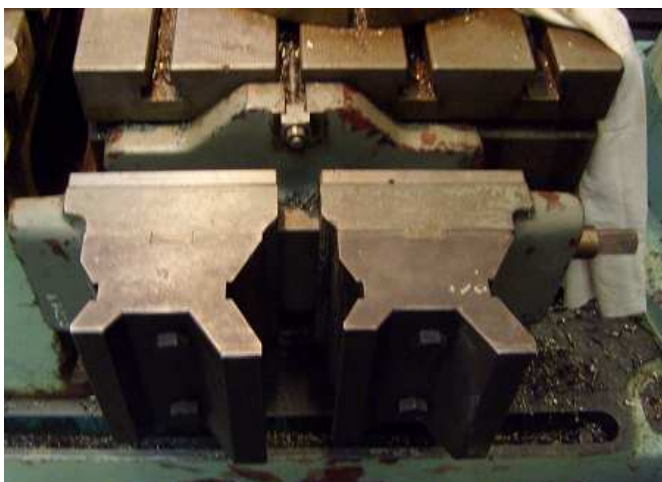
Polotovar vzorků byl vybírán tak, aby jeho úprava na konečný tvar byla co nejmenší, jeho rozměry vyhovovaly parametrům stolu vrtačky a univerzálního sklíčidla, díky kterému byl upínán vzorek v tenzometrickém dynamometru. Maximální průměr vzorku mohl tedy být 125 mm. Polotovar pro většinu vzorků byl poskytnut laboratoří KOM a to o průměru 107 mm. Další potřebný materiál pro dokončení experimentu byl doobjednán u firmy Ferona. Byl zakoupen polotovar o průměru 120 mm.

Aby bylo dosaženo zmíněných parametrů vzorku, bylo zapotřebí nařezat polotovar. Řezání polotovaru proběhlo na pásové pile značky PILOUS ARG 300 Plus H.F. Po nařezání byla výška vzorku 112 mm. Poté následovalo zarovnání čel z obou stran, tím byla dosažena konečná výška vzorku 110 mm. Dále byly zkoseny ostré hrany kvůli bezpečnější manipulaci. Soustružení vzorků proběhlo na soustruhu SU 50. Pro experiment bylo vyrobeno 10 vzorků.

Hotový vzorek byl upnut ve svěráku (obr. 22A), který byl připevněn dvěma šrouby k boku stolu vrtačky. Dotažení svěráku se provádělo ručně pomocí maticového klíče. Z důvodu menšího namáhání tenzometrického dynamometru probíhala většina vrtání ve svěráku, tedy mimo dynamometr (více viz kapitola 5.9). Při potřebě měření posuvové síly a krouticího momentu byl vzorek vyjmut ze svěráku a upnut do univerzálního sklíčidla (obr. 22B) se třemi čelistmi, které bylo součástí dynamometru. Dotažení univerzálního sklíčidla se provádělo pomocí klíčky.

Pro upnutí vrtáku s kuželovou stopkou o průměru 14,5 mm bylo z důvodu malého rozměru nástroje zapotřebí jednoho redukčního pouzdra. Upnutí vrtáku vypadalo tak, že vrták byl dříve upnut do redukčního pouzdra a následně tento „celek“ byl upnut do vřetene vrtačky. K vyjmutí vrtáku z vřetene vrtačky bylo zapotřebí kladiva a vytloukacího klínu. Klín se zasunul do mezery, která je pro tento účel vyrobena na vřeteni vrtačky. Malými údery kladiva do klínu došlo k vypadnutí vrtáku i s pouzdrům.

A)



B)



Obr. 22 A) svěrák, B) upnutí vzorku univerzálním sklíčidlem

#### 5.4 Ovládání radiální vrtačky VR 4

Pro uskutečnění experimentu na radiální vrtačce VR 4 bylo zapotřebí se plně seznámit s funkcemi a ovládáním tohoto stroje.

Radiální vrtačka VR 4 byla vždy uvedena do chodu hlavním vypínačem do polohy ON (obr. 23A). Dále bylo nutné před začátkem práce upnout nástroj (viz kapitola 5.3). Poté nastavit a zařadit otáčky a posuv. Nastavení se provedlo otočením ovládacího kolečka (obr. 23B) na požadovaný parametr (více viz kapitola 5.5).

A)



B)



Obr. 23 A) hlavní vypínač, B) ovládací kolečko - nastavení otáček (vnější kolečko) a posuvů (vnitřní kolečko)

Po tomto nastavení bylo zapotřebí zařadit otáčky a posuv stroje řadicí pákou (obr. 24). To bylo provedeno pohybem řadicí páky dolů a zpět. Dále bylo třeba stisknout tlačítko na hlavním panelu (obr. 25) a to z důvodu, aby byl tento panel uveden do provozu. Na hlavním panelu bylo možno ovládat „joystickem“ otáčení vřetene a pohyb

vřeteníku nahoru a dolů. Před uvedením vřeteníku do pohybu nahoru a dolů bylo zapotřebí odjistit páku, ta byla umístěna na sloupu vrtačky (obr. 26). Po nastavení požadované výšky bylo nutné vřeteník opět zajistit stejnou pákou.



Obr. 24 Páka pro zařazení otáček a posuvů

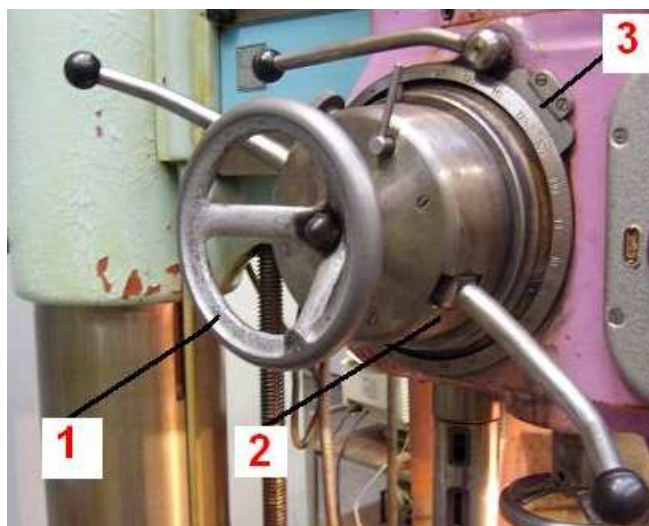


Obr. 25 Hlavní ovládací panel



Obr. 26 Páka pro zajištění pohybu ramene vrtačky nahoru a dolů

Pro nastavení polohy vrtání bylo zapotřebí natočit rameno a pohnout s vřeteníkem. Natočení ramene se provádělo ručně. Horizontální pohyb (doprava, doleva) vřeteníku po rameni se prováděl opět ručně a to točením kola (obr. 27). K odjištění a zajištění natočení ramene a horizontálnímu pohybu vřeteníku sloužila páka umístěna na rameni vrtačky (obr. 28). Pohyb vřetene nahoru a dolů byl ovládán pákami na kole (obr. 27). Pohyb lze mít strojní nebo ruční. Strojní posuv byl vždy uveden do chodu přitáhnutím pák na kole k sobě, odtažením pák od sebe byl posuv ruční.



Obr. 27 Ovládání: 1 - horizontální pohyb vřeteníku po rameni, 2 - pohyb vřetene (nahoru a dolů), 3 - nastavení hloubky díry vrtání



Obr. 28 Páka pro zajištění natočení ramene a horizontálního pohybu vřeteníku

## 5.5 Volba řezných podmínek

Jeden z prvních kroků bylo zjištění vhodných řezných podmínek pro proces vrtání. Řezné podmínky byly voleny tak, aby během obrábění bylo možno průběžně sledovat procesní veličiny (viz kapitola 5.1). Vhodné řezné podmínky byly zjištěny ve zkušebním procesu.

Základní myšlenkou experimentu bylo provedení práce v co nejkratším čase a při minimálních nákladech. To znamenalo dosáhnout poměrně rychlého opotřebení vrtáku (během experimentu nebyla použita žádná procesní kapalina) a obrobit pokud možno malý objem materiálu s nízkým počtem nástrojů. Proto bylo snahou zkušebního procesu zjistit co nejvýhodnější možné řezné podmínky, které budou vyhovovat těmto požadavkům.

Při prvním pokusu byly zvoleny otáčky vrtáku  $n = 710 \text{ min}^{-1}$  a posuv vrtáku  $f = 0,025 \text{ mm/ot.}$  Po vyvrtání několika otvorů bylo zřejmé, že vrták není namáhán podle



našich představ. Proto tyto řezné podmínky byly vyhodnoceny jako NEVYHOVUJÍCÍ.

Při druhém pokusu byly zvoleny otáčky vrtáku  $n = 1400 \text{ min}^{-1}$  a posuv vrtáku  $f = 0,025 \text{ mm/ot}$ . Při tomto zkušebním procesu byl vrták během několika sekund velice rychle otupen (obr. 29). Proto tyto řezné podmínky byly vyhodnoceny jako NEVYHOVUJÍCÍ.



Obr. 29 Otupený vrták; řezné podmínky  $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ ,  $f = 0,025 \text{ mm/ot}$

V třetím pokusu byly zvoleny otáčky vrtáku  $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ , protože stroj nenabízí žádné jiné možné otáčky mezi  $710 \text{ min}^{-1}$  a  $1400 \text{ min}^{-1}$ . Posuv vrtáku byl  $f = 0,025 \text{ mm/ot}$ . Při vrtání šesté díry, ale došlo nečekaně ke kolizi a vrták byl z neznámých příčin zlomen (obr. 30). Jedna z příčin mohla být vysoká teplota, která vznikala při vrtání. Po této kolizi byl upnut nový vrták a byly použity stejné řezné podmínky. Řezné podmínky byly zachovány a to proto, že návrat k menším otáčkám by znamenal pomalejší dosažení otupení vrtáku. Obráběcí proces byl následně více monitorován kvůli bezpečnosti a zamezení opětovné kolize. Během vrtání bylo zřejmé, že byl vrták (obr. 31) ve velké míře zahříván, povrch vrtané díry nebyl ideální, vznikaly modré třísky a docházelo k pálení povrchu vzorku okolo vrtané díry (obr. 32). Proto po několika vyvrtaných otvorech bylo rozhodnuto, že stávající řezné podmínky nejsou ideální a byly označeny za NEVYHOVUJÍCÍ.

Při čtvrtém pokusu nebyla jiná možnost, než použít stejné řezné podmínky jako v prvním a vrátit se tedy k menším otáčkám. Tyto řezné podmínky byly následně vyhodnoceny jako VYHOVUJÍCÍ. Konečné řezné podmínky byly po celou dobu experimentu konstantní a měly tyto hodnoty:

- otáčky:  $n = 710 \text{ min}^{-1}$ ,
- řezná rychlost:  $v_c = 32,34 \text{ m.min}^{-1}$ ,
- posuv:  $f = 0,025 \text{ mm.ot}^{-1}$ .



Obr. 30 Kolize vrtáku; řezné podmínky  $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ ,  $f = 0,025 \text{ mm/ot}$



Obr. 31 Otupený vrták; řezné podmínky  $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ ,  $f = 0,025 \text{ mm/ot}$



Obr. 32 Povrch vzorku; řezné podmínky  $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ ,  $f = 0,025 \text{ mm/ot}$

## 5.6 Kalibrace tenzometrického dynamometru

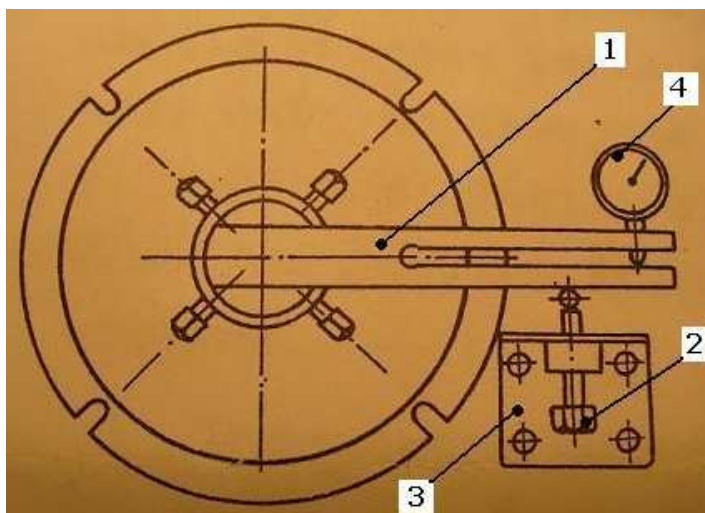
Pro správné převádění výstupního signálu (velikosti napětí) z měřících čidel do počítače bylo nutné kalibrovat dynamometr.

Dynamometr byl kalibrován na:

- krouticí moment,
- posuvovou sílu.

### 5.6.1 Kalibrace dynamometru na krouticí moment

Do držáku tenzometrického dynamometru byla upevněna kalibrační siloměrná vidlice, na kterou bylo později působeno silou přes kulový dotek. Síla byla vyvozena šroubem, který byl veden v matici zvláštního stojánu upevněného na upínacím stole vedle dynamometru. Schéma kalibračního zařízení je zobrazeno na obr. 33.

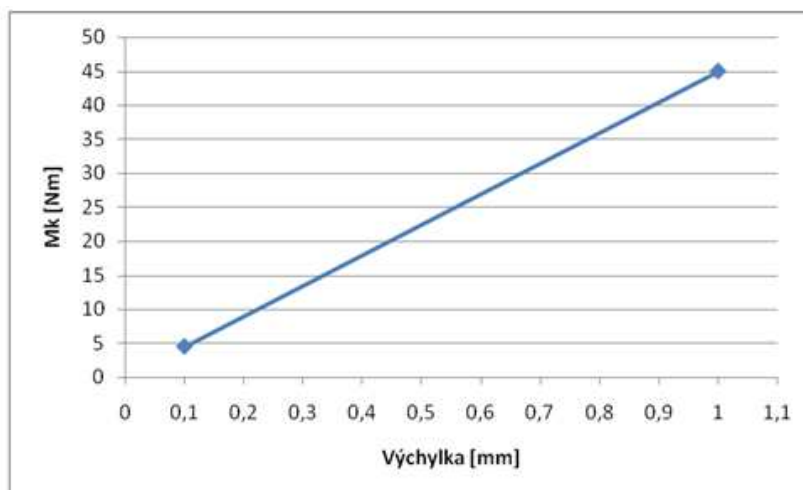


Legenda: 1 – siloměrná vidlice, 2 – šroub, 3 – stojánek, 4 – úchylkoměr

Obr. 33 Schéma kalibračního zařízení pro krouticí moment [20]

Velikost krouticího momentu byla nastavena dle setinového úchylkoměru upevněného do siloměrné vidlice. Velikost krouticího momentu odpovídala určité výchylce úchylkoměru zjištěné z kalibrační křivky (graf 1) siloměrné vidlice. V našem případě bylo známo, že se výchylka 1 mm rovnala 45 Nm.

Kalibrace byla provedena v programu INMES. Pro sestavení kalibrační křivky stačilo zadat dvě hodnoty krouticího momentu, zbytek hodnot byl automaticky dopočítán programem ( $0,1 \text{ mm} = 4,5 \text{ Nm}$ ;  $1 \text{ mm} = 45 \text{ Nm}$ ).

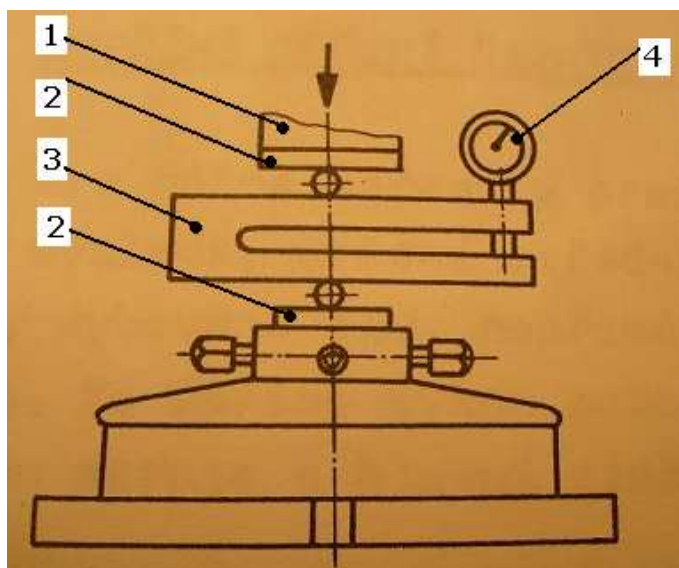


Graf 1. Kalibrační křivka pro krouticí moment



### 5.6.2 Kalibrace dynamometru na posuvovou sílu

Do držáku tenzometrického dynamometru byla upevněna vložka, na kterou bylo později působeno vřetenem radiální vrtačky přes siloměrnou vidlici ve směru posuvové síly. Zatěžování bylo provedeno tím, že bylo působeno vřetenem vrtačky, v němž byla uložena opěrná vložka na siloměrný třmen položený na dynamometru. Zapojeným automatickým posuvem (motor vrtačky byl vypnut) a ručním kolečkem na spodní straně vřeteníku vrtačky vedle vřetene bylo provedeno zatěžování. Schéma kalibračního zařízení je zobrazeno na obr. 34.

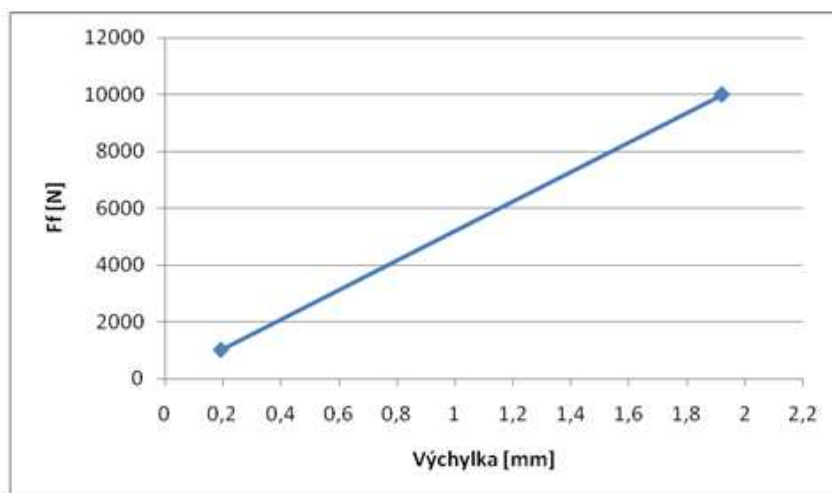


Legenda: 1 – vřeteno vrtačky, 2 – opěrná vložka, 3 – siloměrná vidlice,  
4 – úchylkoměr

Obr. 34 Schéma kalibračního zařízení pro posuvovou sílu [20]

Velikost síly byla opět nastavena dle setinového úchylkoměru upnutého v siloměrné vidlici. Velikost posuvové síly odpovídající určité výchylce úchylkoměru byla zjišťována z kalibrační křivky (graf 2) siloměrné vidlice. V našem případě bylo známo, že se výchylka 1,92 mm rovnala 10000 N.

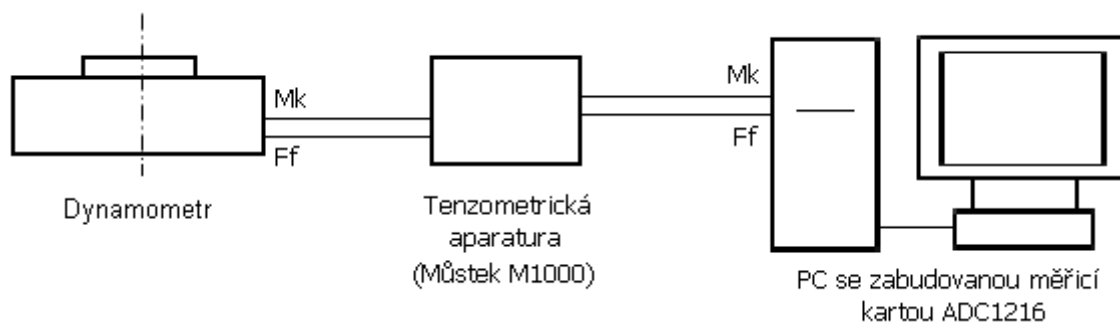
Kalibrace byla provedena v programu INMES. Pro sestrojení kalibrační křivky stačilo zadat dvě hodnoty posuvové síly, zbytek hodnot byl automaticky dopočítán programem (0,192 mm = 1000 N; 1,92 mm = 10000 N).



Graf 2. Kalibrační křivka pro posuvovou sílu

### 5.7 Schéma zapojení použitého zařízení

Zařízení použitá pro experiment byla zapojena dle schématu na obr. 35.



Obr. 35 Schéma zapojení použitého zařízení

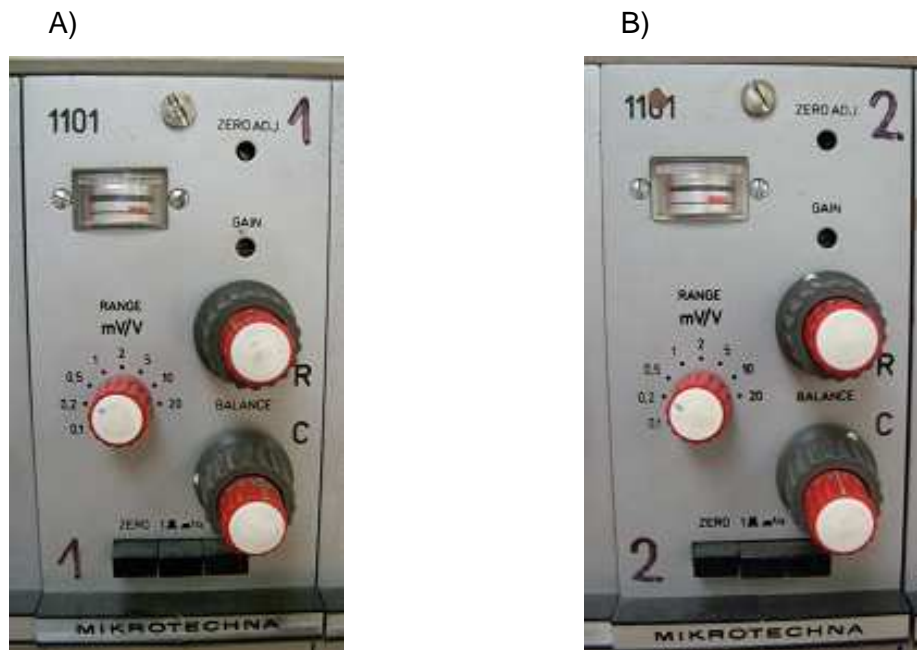
( $M_k$  – kroučící moment,  $F_f$  – posuvová síla)

### 5.8 Příprava měřícího zařízení

Každému měření předcházela nutná příprava měřidel. Z důvodu získání nezkrácených výstupních veličin z tenzometrického dynamometru (posuvové síly a kroučícího momentu), bylo zapotřebí, aby termočlánky byly zahřány na pracovní teplotu. Proto bylo nutné zapnout dynamometr a můstek M1000 minimálně jednu hodinu před samotným měřením. Zapnutí bylo provedeno hlavním vypínačem na můstku M1000 (obr. 14). Současně byl zapnut počítač a potom i program INMES, díky kterému byly výstupní (naměřené) veličiny ukázány na displeji počítače v číslicových hodnotách a zaznamenány do paměti. Spuštění programu se provedlo najetím kurzoru na „INMES“ → „INMES.exe“.

Dále před samotným měřením bylo třeba vyladit hodnoty posuvové síly a kroučícího momentu. To se provedlo najetím kurzoru v horním panelu programu na „KANÁ-

LY“ → „Číslo měření“ → „Cyklicky“ a pak se začaly vyladřovat jednotlivé hodnoty k nule. Krouticí moment se vyladřoval na můstku M1000 s číslem panelu „1“ a to točným vrchním šedým kolečkem (obr. 36A). Posuvová síla se vyladřovala na můstku s číslem panelu „2“ a to opět točením vrchního šedého kolečka (obr. 36B). Tyto hodnoty bylo dobré kontrolovat v průběhu celého měření z důvodu získávání přesných výstupních veličin a v případě nutnosti je doladřovat k nule.



A) Panel „1“- nastavení krouticího momentu, B) Panel „2“-nastavení posuvové síly

Obr. 36 Můstek M1000

## 5.9 Postup měření

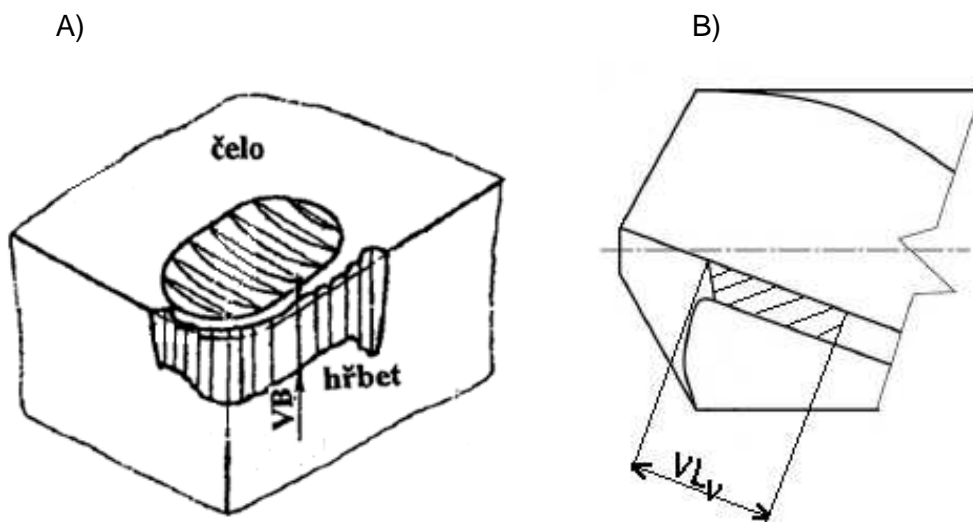
Při samotném měření byla radiální vrtačka VR 4 uvedena do chodu (viz kapitola 5.4), byly nastaveny řezné podmínky (viz kapitola 5.5) a bylo zprovozněno měřicí zařízení (viz kapitola 5.8). Dále byl upnut nástroj a vzorek (viz kapitola 5.3). Následně byla nastavena hloubka díry. Poté co se hrot vrtáku dotkl povrchu vzorku, byla nastavena hodnota 53 mm otočením kolečka se stupnicí (obr. 27). Hodnota 53 mm byla nastavena z toho důvodu, aby celková hloubka díry odpovídala 50 mm. Strojní čas pro obrobení jedné díry byl 2,82 minuty.

Na začátku experimentu byl použit nový vrták. Při zcela neotupeném vrtáku byl vzorek upnut do univerzálního sklíčidla dynamometru (obr. 22B). To umožňovalo změřit krouticí moment a posuvovou sílu hned při první obráběné díře.

Během experimentu byla měřena každá pátá díra. Postup každé měřené díry byl následující. Během vrtání jednoho otvoru bylo spuštěno měření dynamometrem celkem 5x, a to v hloubkách 10, 20, 30, 40 a 50 mm. V programu INMES bylo spuštěno

měření tak, že v horním panelu se najelo kurzorem na „MĚŘENÍ“ → „start“. Čas jednoho měření v určité hloubce byl 3 sekundy. Pro zjištění výsledku měření bylo najeto kurzorem v horním panelu programu na „ANALÝZA“ → „statistika“. Naměřené střední hodnoty krouticího momentu a posuvové síly byly následně zapsány z displeje počítače do tabulky. Z důvodu menšího namáhání tenzometrického dynamometru probíhala většina vrtání ve svěráku (obr. 22A), tedy mimo dynamometr. Při potřebě měření posuvové síly a krouticího momentu byl vzorek vyjmut ze svěráku a upnut do dynamometru. Tento průběh měření byl dodržován až do konečného otupení vrtáku (kapitola 6.2.1).

Po vyvrtání každé páte díry probíhala kontrola vrtáku. Nástrojovou lupou Brinell (kapitola 4.7) bylo kontrolováno ostří hlavní, vedlejší a příčné. Velikost otupení jednotlivého ostří byla zapisována do tabulky. Velikost otupení hlavního ostří byla určena hodnotou šířky otřené plochy, pro tento experiment byla značena zkratkou  $VB_H$  ( $VB_{H1}$  – první hlavní ostří,  $VB_{H2}$  – druhé hlavní ostří). Velikost otupení příčného ostří byla určena hodnotou šířky otřené plochy, pro tento experiment byla značena zkratkou  $VB_P$ . Velikost „otupení“ vedlejšího ostří byla určena délkou otěru po šroubovici (fazetce), pro tento experiment byla tato velikost „otupení“ značena zkratkou  $VL_V$  ( $VL_{V1}$  – první vedlejší ostří,  $VL_{V2}$  – druhé vedlejší ostří). V tomto případě by bylo vhodnější brát „otupení“ na vedlejších ostřích spíše jako plochu, kde došlo na fazetce vlivem tření mezi materiálem vzorku a vrtákem k viditelnému opotřebení. Na obr. 37 jsou názorně zobrazena jednotlivá označení otupení.



A)  $VB$  – průměrné opotřebení hřbetu ( $VB_H$ ,  $VB_P$ ),

B)  $VL_V$  – průměrné opotřebení vedlejšího ostří

Obr. 37 Označení otupení řezného nástroje

V průběhu experimentu byl dále kontrolován rozměr (průměr) vyvrtané díry pomocí digitálního třídotekového dutinoměru (kapitola 4.9). Vybrané díry byly měřeny v celé její hloubce.

### 5.9.1 Jakost povrchu obrobené plochy

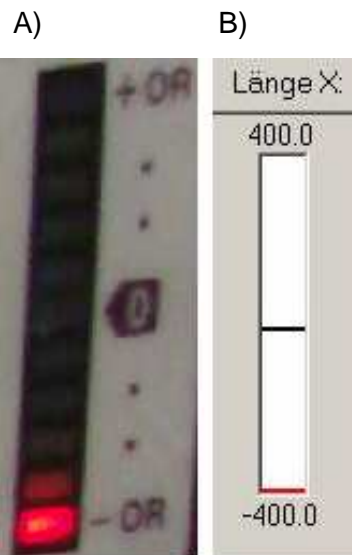
Pro měření jakosti obrobených ploch byl použit drsnoměr Mitutoyo SV 2000 (kapitola 4.8). Spolupracoval se softwarem SURFPAK, pomocí kterého byla uskutečněna veškerá měření. Software SURFPAK byl spuštěn před měřením na počítači, který byl připojen k drsnoměru.

Měřený vzorek byl ustaven na pohyblivý křížový stůl (obr. 38), díky pohyblivosti bylo možné měřit povrch každé vyvrtané díry v celé její hloubce.

Pro změření hodnot jakosti povrchu bylo opatrně najeto snímacím hrotem do vyvrtané díry (obr. 38), a to způsobem, že směr pohybu snímacího hrotu při měření se shodoval s osou vyvrtané díry. Po najetí bylo nutné dotknout se snímacím hrotem obrobeného povrchu v požadovaném rozsahu, a to z důvodu zamezení zkreslení naměřených hodnot a nepoškození diamantového hrotu. K tomu sloužil pohyblivý stůl (pohyb nahoru a dolů), na kterém byl drsnoměr upevněn. Pohyb byl uskutečněn otočným kolečkem, zobrazeném na obr. 17. Pro kontrolu správné polohy v tolerančním poli rozsahu sloužila signální stupnice na drsnoměru (obr. 39A), stejný účel měla stupnice v softwaru SURFPAK (obr. 39B). Zahájit měření bylo možné až po dosažení nulové polohy v požadovaném rozsahu.



Obr. 38 Ustavení vzorku na křížovém stole



A) Na drsnoměru,

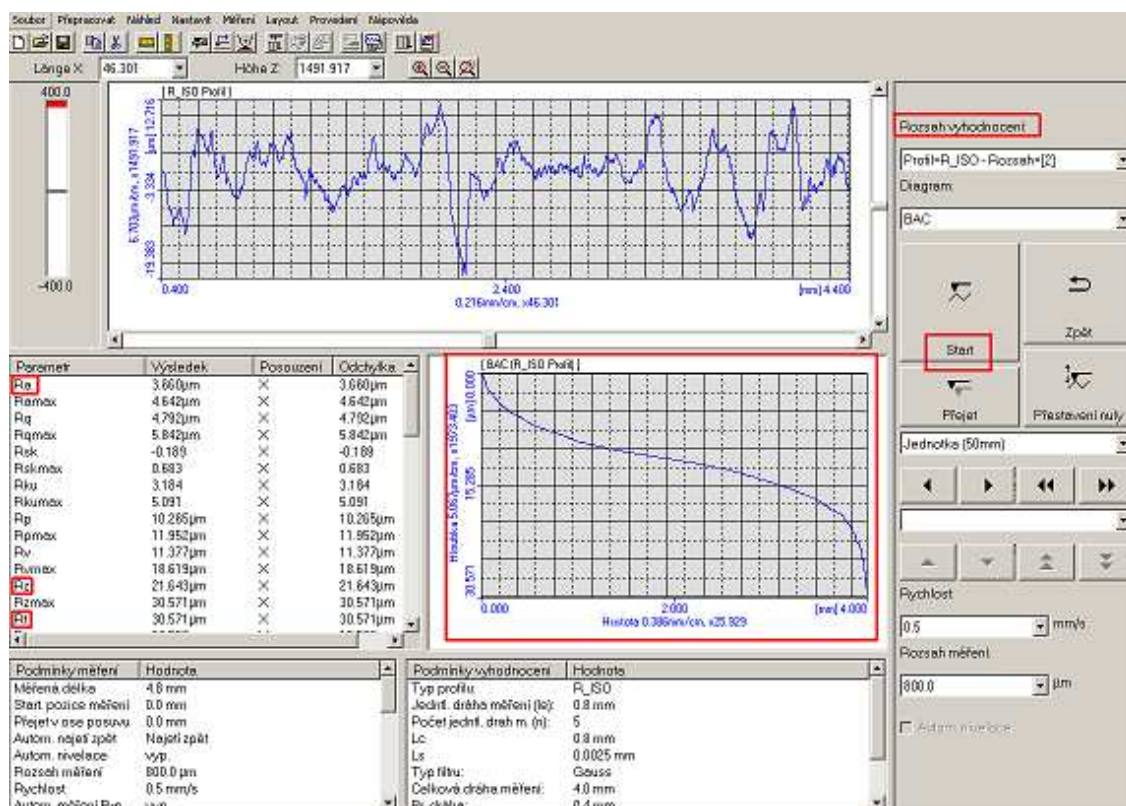
B) V softwaru SURFPAK

Obr. 39 Signální stupnice

Měření jakosti obrobené plochy probíhalo tak, že byla měřena každá desátá vyvrtaná díra. U měřené díry se opakovalo měření jakosti povrchu celkem pětkrát a vždy na jiném místě povrchu, aby se dosáhlo průměrné hodnoty jakosti povrchu obrobené díry. Změna místa byla provedena pootočením vzorku nebo posunutím křížového stolu ve směru osy díry. Způsob měření každého desátého otvoru byl zvolen z toho důvodu, že parametry jakosti povrchu se měnily minimálně s počtem přibývajících děr. To bylo zjištěno tak, že na začátku měření byla změřena první a dvoustá díra.

Před spuštěním měření bylo nutné nastavit v softwaru SURFPAK rozsah vyhodnocení na „Profil=R\_ISO“ (obr. 40), který zobrazoval parametry dle normy ISO.

Aby se snímací hrot dal do pohybu, bylo nutné stisknout v softwaru SURFPAK tlačítko „start“ (obr. 40). Tím bylo spuštěno měření a hrot snímal povrch po dobu pojezdu, který byl 4,8 mm. Na konci dráhy požádal software hláškou o zkontrolování polohy hrotu, aby nedošlo k jeho poškození při návratu do původní polohy. Proto bylo nutné vždy odjet drsnoměrem nahoru mimo rozsah měření. To bylo provedeno pootočením kolečka (obr. 17). Když byl hrot v bezpečné vzdálenosti, potvrdila se hláška stisknutím tlačítka „ok“ a hrot se automaticky vrátil do počáteční polohy měření. Tento postup se opakoval celkem pětkrát, a to pokaždé na jiném místě díry [11].



Obr. 40 Software SURFPAK

Software SURFPAK naměřil velké množství dat jakosti obrobeného povrchu. Pro naše potřeby byly zaznamenávány následující parametry (obr. 40):

- $R_a$  – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu,
- $R_z$  – největší výška profilu v rozsahu základní délky,
- $R_t$  – celková výška profilu v rozsahu vyhodnocované délky
- Abbottova křivka [11].



## 6. Vyhodnocení měření

### 6.1 Postup vyhodnocení měření

U experimentu byly vyhodnoceny tyto sledované parametry:

- posuvová síla,
- krouticí moment,
- jakost obrobené plochy,
- otupení vrtáku.

Vyhodnocení posuvové síly a krouticího momentu bylo provedeno postupným zapsáním naměřených středních hodnot z displeje počítače do příslušných tabulek.

Pro vyhodnocení jakosti obrobené plochy byly zaznamenány tři parametry drsnosti ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ) a Abbottova křivka (křivka nosného profilu), která má vypovídající schopnost o struktuře profilu povrchu obrobeného vzorku. Abbottova křivka popisuje vzrůst materiálového podílu se stoupající velikostí hloubky profilu drsnosti. Při hodnocení grafického vyjádření bylo přihlášeno k průběhu a poloze křivky. Klesá-li křivka pozvolna, jedná se o plný profil s nepatrným objemem prohlubní, a tedy o povrch s velmi dobrými vlastnostmi proti opotřebení. Strmě klesající křivka naproti tomu poukazuje na silné pukliny v povrchu a tím na nepříznivé vlastnosti opotřebení [29]. U tohoto experimentu klesala křivka pozvolna.

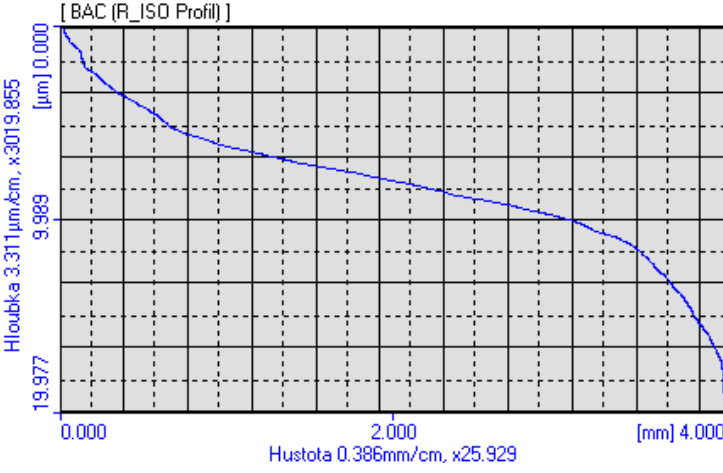
Během experimentu bylo sledováno ostří příčné, hlavní a vedlejší (kapitola 5.9). Při experimentu mělo otupení všech tří pozorovaných ostří různou intenzitu a probíhala nerovnoměrně. Velikost otupení hlavního ostří je značena zkratkou  $VB_H$  ( $VB_{H1}$  – první hlavní ostří,  $VB_{H2}$  – druhé hlavní ostří). Velikost otupení příčného ostří je značena zkratkou  $VB_p$ . Velikost „otupení“ vedlejšího ostří je značena zkratkou  $VL_V$  ( $VL_{V1}$  – první vedlejší ostří,  $VL_{V2}$  – druhé vedlejší ostří). Vyhodnocení údajů týkajících se otupení vrtáku bylo provedeno zapsáním naměřených hodnot do příslušné tabulky.

### 6.2 Výsledky experimentu

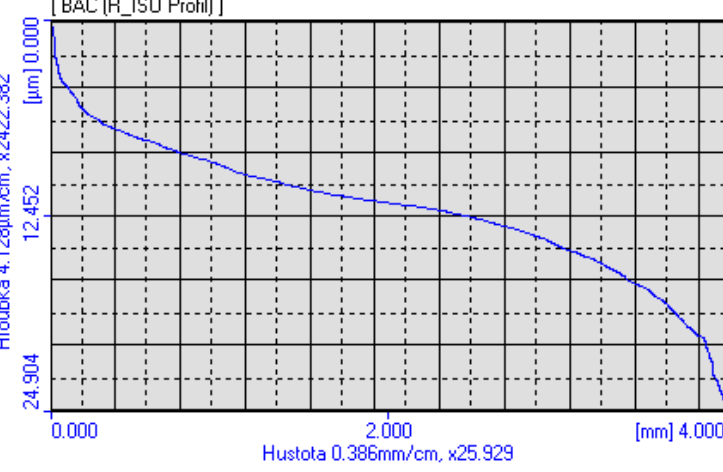
U jakosti obrobené plochy byl zapisován aritmetický průměr z pěti naměřených hodnot ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ) a Abbottova křivka. Dále byla uvedena kontrola průměru vyvrtané díry. Jako díra o vyhovujících rozměrech byla vyhodnocena každá, která měla průměr v celé její hloubce větší nebo roven 14,45 mm. Naopak díra s průměrem menším než 14,45 mm byla vyhodnocena jako nevyhovující.

Všechny sledované hodnoty, které byly naměřeny během experimentu, jsou uvedeny v příloze I. Pro větší přehled byly výsledky experimentu uvedeny do souhrnných obrázků (obr. 41 až obr. 50) s odstupem otupení 0,1 mm na hlavním a příčném ostří.

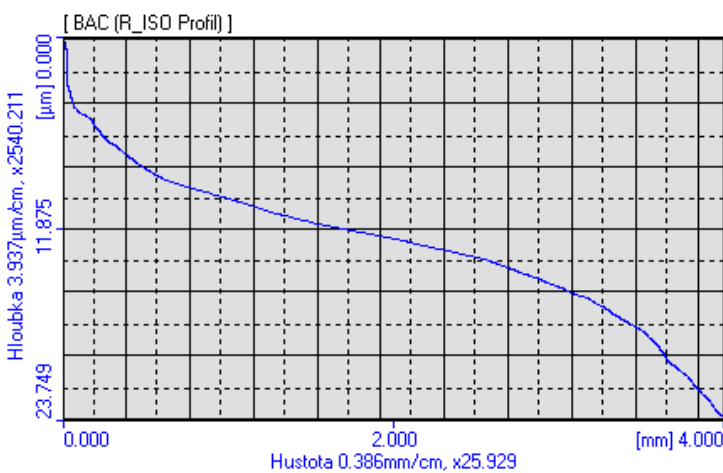


Počet vyvrtaných děr		1	Kontrola průměru		vyhovující
	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm
$M_k$ [Nm]	3,76	4,23	4,42	4,09	4,3
$F_f$ [N]	826,07	793,92	1031,48	733,92	876,66
$VB_{H1}$ [mm]	0				
$VB_{H2}$ [mm]	0				
$VB_P$ [mm]	0				
$VL_{V1}$ [mm]	0				
$VL_{V2}$ [mm]	0				
$R_a$ [µm]	3,27				
$R_z$ [µm]	17,33				
$R_t$ [µm]	19,36				

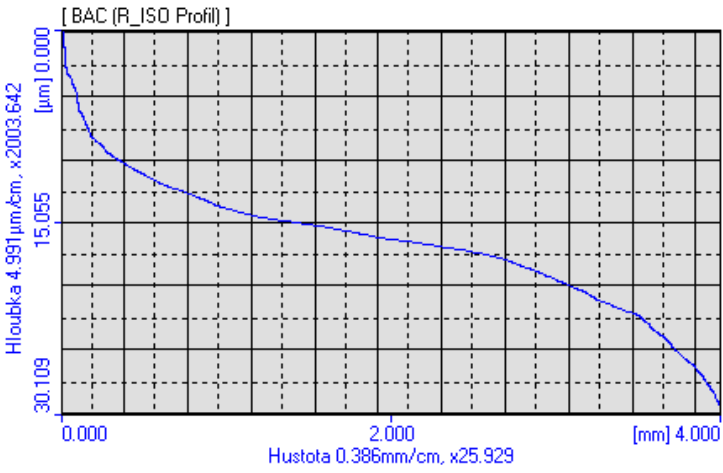
Obr. 41 – Výsledky měření – 1. díra

Počet vyvrtaných děr		25	Kontrola průměru		vyhovující
	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm
$M_k$ [Nm]	4,18	4,26	4,39	4,03	4,41
$F_f$ [N]	1013,32	875,32	1018,74	1021,26	1002,57
$VB_{H1}$ [mm]	0,1				
$VB_{H2}$ [mm]	0				
$VB_P$ [mm]	0				
$VL_{V1}$ [mm]	7				
$VL_{V2}$ [mm]	0				
$R_a$ [µm]	3,16				
$R_z$ [µm]	16,75				
$R_t$ [µm]	18,7				

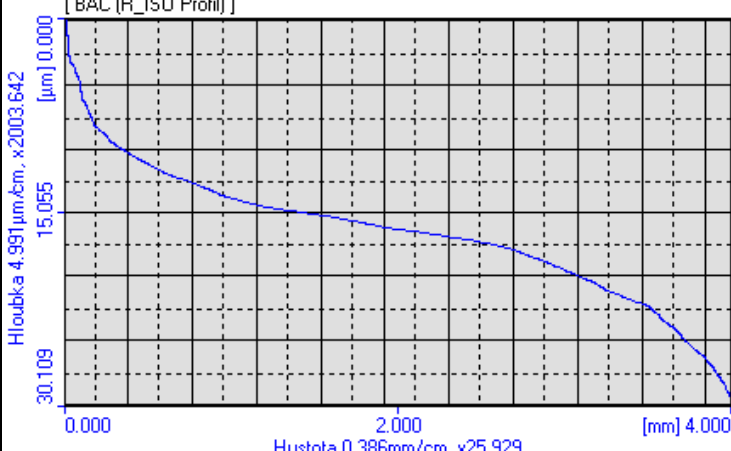
Obr. 42 – Výsledky měření – 25. díra

Počet vyvrtaných děr		60	Kontrola průměru		vyhovující
	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm
M <sub>k</sub> [Nm]	4,31	4,1	4,41	3,69	4,48
F <sub>f</sub> [N]	1047,55	1023,41	1050,43	1206,6	1118,4
VB <sub>H1</sub> [mm]	0,1				
VB <sub>H2</sub> [mm]	0				
VB <sub>P</sub> [mm]	0,1				
VL <sub>V1</sub> [mm]	7				
VL <sub>V2</sub> [mm]	0				
Ra [µm]	3,56				
Rz [µm]	19,22				
Rt [µm]	21,36				

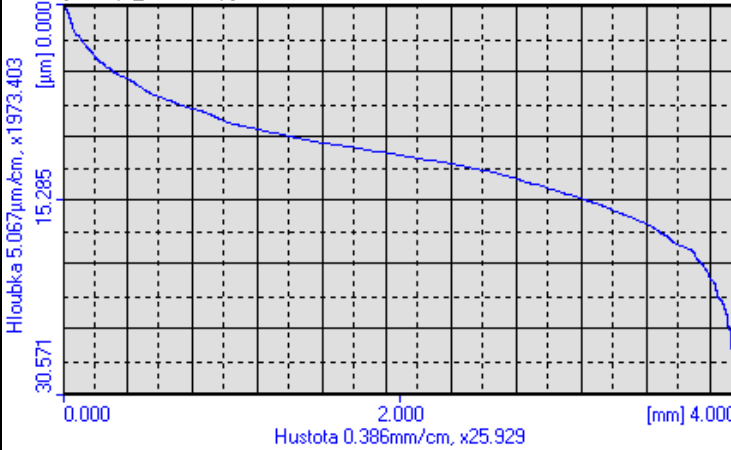
Obr. 43 – Výsledky měření – 60. díra

Počet vyvrtaných děr		150	Kontrola průměru		vyhovující
	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm
M <sub>k</sub> [Nm]	4,91	4,97	5,56	5,96	6,23
F <sub>f</sub> [N]	1073,94	981,67	1098,42	1079,79	1077,5
VB <sub>H1</sub> [mm]	0,15				
VB <sub>H2</sub> [mm]	0,1				
VB <sub>P</sub> [mm]	0,15				
VL <sub>V1</sub> [mm]	10				
VL <sub>V2</sub> [mm]	0				
Ra [µm]	3,65				
Rz [µm]	19,16				
Rt [µm]	22,27				

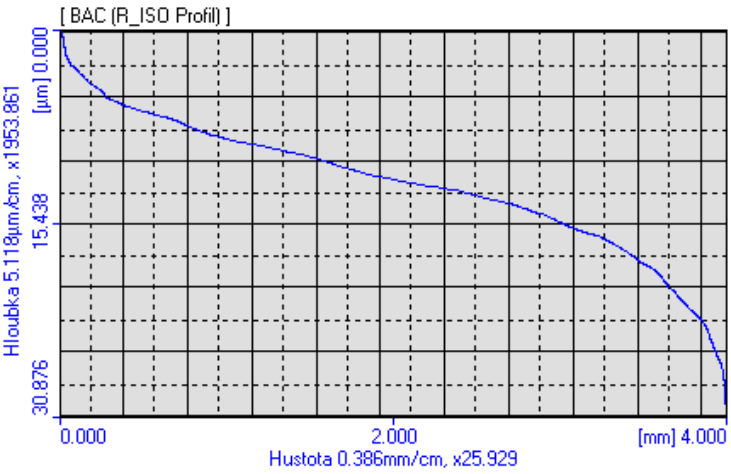
Obr. 44 – Výsledky měření – 150. díra

Počet vyvrtaných děr		165	Kontrola průměru		vyhovující
	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm
$M_k$ [Nm]	4,87	5,21	5,53	5,98	6,01
$F_f$ [N]	1112,08	1041,31	1021,5	1149,36	1170,3
$VB_{H1}$ [mm]	0,15				
$VB_{H2}$ [mm]	0,1				
$VB_P$ [mm]	0,2				
$VL_{V1}$ [mm]	10				
$VL_{V2}$ [mm]	0				
$R_a$ [µm]	3,77				
$R_z$ [µm]	19,98				
$R_t$ [µm]	23,37				

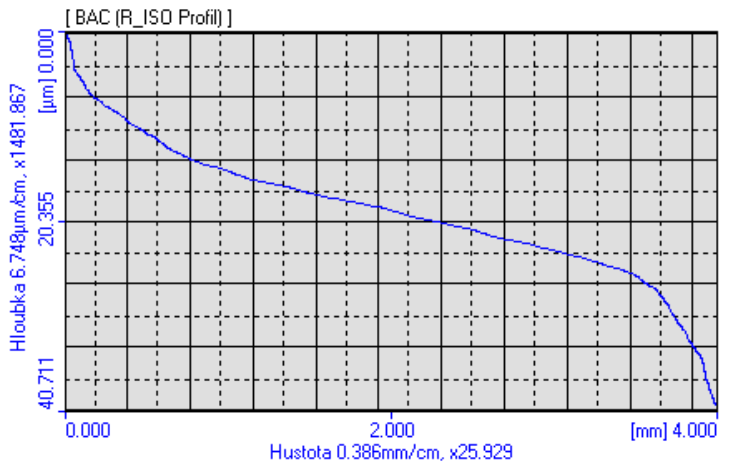
Obr. 45 – Výsledky měření – 165. díra

Počet vyvrtaných děr		175	Kontrola průměru		vyhovující
	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm
$M_k$ [Nm]	5,26	5,43	5,38	6,37	6,84
$F_f$ [N]	1137,66	957,44	1013,48	1137,95	1063,6
$VB_{H1}$ [mm]	0,2				
$VB_{H2}$ [mm]	0,1				
$VB_P$ [mm]	0,2				
$VL_{V1}$ [mm]	11,3				
$VL_{V2}$ [mm]	0				
$R_a$ [µm]	3,84				
$R_z$ [µm]	20,73				
$R_t$ [µm]	25,38				

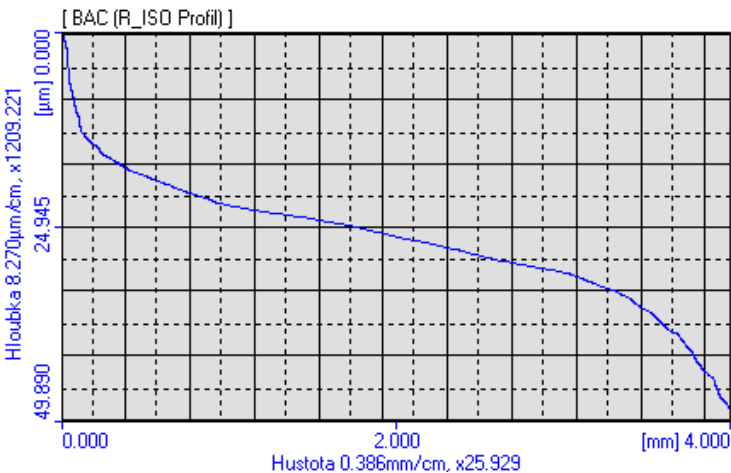
Obr. 46 – Výsledky měření – 175. díra

Počet vyvrtaných děr		235	Kontrola průměru		vyhovující
	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm
M <sub>k</sub> [Nm]	5,31	5,25	5,87	6,29	6,68
F <sub>f</sub> [N]	1084,39	1017,24	991,66	923,63	908,53
VB <sub>H1</sub> [mm]	0,2				
VB <sub>H2</sub> [mm]	0,1				
VB <sub>P</sub> [mm]	0,3				
VL <sub>V1</sub> [mm]	11,3				
VL <sub>V2</sub> [mm]	0				
Ra [μm]	3,79				
Rz [μm]	20,12				
Rt [μm]	26,01				

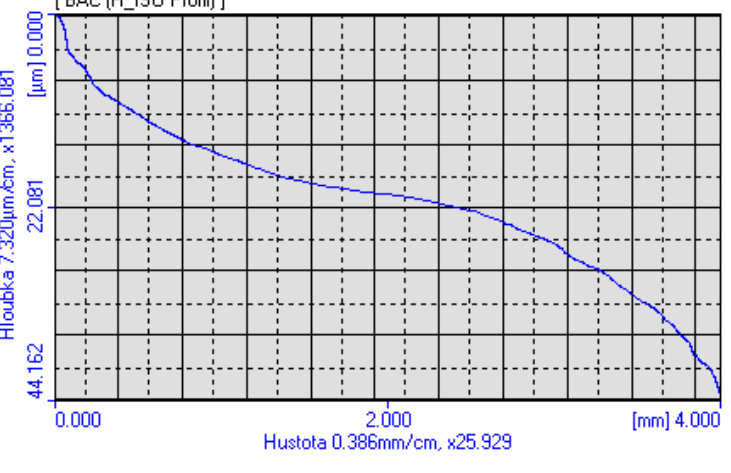
Obr. 47 – Výsledky měření – 235. díra

Počet vyvrtaných děr		310	Kontrola průměru		vyhovující
	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm
M <sub>k</sub> [Nm]	5,7	6	6,38	6,27	6,36
F <sub>f</sub> [N]	1051,62	987,81	1099,84	1115,17	1132,88
VB <sub>H1</sub> [mm]	0,2				
VB <sub>H2</sub> [mm]	0,1				
VB <sub>P</sub> [mm]	0,4				
VL <sub>V1</sub> [mm]	14				
VL <sub>V2</sub> [mm]	0				
Ra [μm]	5,04				
Rz [μm]	27,03				
Rt [μm]	32,76				

Obr. 48 – Výsledky měření – 310. díra

Počet vyvrtaných děr		390	Kontrola průměru		vyhovující
	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm
$M_k$ [Nm]	6,24	7,36	7,58	8,25	8,93
$F_f$ [N]	1095,63	1120,95	1174,38	1134,81	908,85
$VB_{H1}$ [mm]	0,25				
$VB_{H2}$ [mm]	0,15				
$VB_P$ [mm]	0,45				
$VL_{V1}$ [mm]	16,3				
$VL_{V2}$ [mm]	0				
$R_a$ [µm]	5,37				
$R_z$ [µm]	27,92				
$R_t$ [µm]	35,44				

Obr. 49 – Výsledky měření – 390. díra

Počet vyvrtaných děr		395	Kontrola průměru		nevyhovující
	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm
$M_k$ [Nm]	6,55	8,57	9,46	9,42	10,56
$F_f$ [N]	1374,63	1186,15	1121,73	1228,55	1139,2
$VB_{H1}$ [mm]	0,3				
$VB_{H2}$ [mm]	0,15				
$VB_P$ [mm]	0,5				
$VL_{V1}$ [mm]	50				
$VL_{V2}$ [mm]	50				
$R_a$ [µm]	6,03				
$R_z$ [µm]	32,56				
$R_t$ [µm]	37,38				

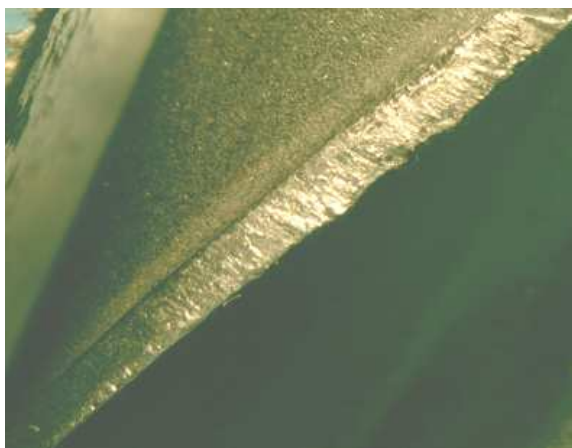
Obr. 50 – Výsledky měření – 395. díra

### 6.2.1 Ukončení experimentu

Měření bylo ukončeno v okamžiku (díra č. 395), kdy došlo, zřejmě vlivem vysokého tepelného a mechanického zatížení, k plastické deformaci na vedlejších ostřích vrtáku (došlo k tzv. lavinovému opotřebení). Původní „opotřebení“ zaniklo a vzniklo nové po celé délce šroubovice (50 mm). Takto otupený vrták se projevoval zvýšením krouticího momentu, nevyhovujícím rozměrem vyvrtané díry, vysokou vibrací upnutého obrobku a nadměrným hlukem při vrtání. Na obrázku 51, 52 a 53 je vidět změna „otupení“ během experimentu na vedlejších ostřích ( $VL_{V1}$ ).



Obr. 51 Vedlejší ostří, vyvrtána 1 díra



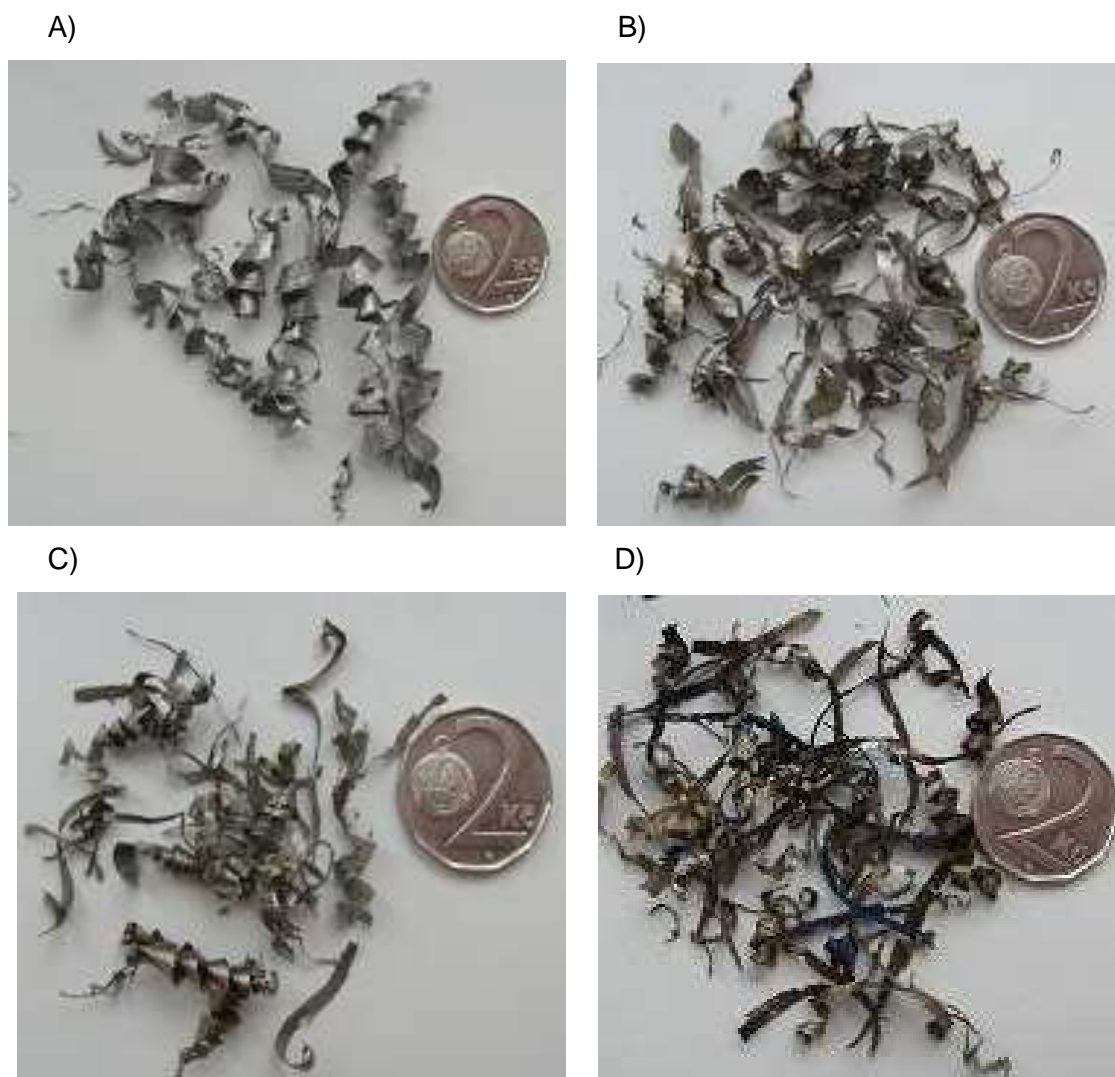
Obr. 52 Vedlejší ostří, vyvrtáno 60 děr



Obr. 53 Vedlejší ostří, vyvrtáno 395 děr

### 6.2.2 Tvar odebrané třísky

V průběhu obráběcího procesu docházelo ke změně tvaru odebrané třísky. Každá výrazná změna tvaru odebrané třísky v závislosti na počtu vyvrtaných děr je vidět na obr. 54. Pro zastoupení měřítka byla na obrázku použita kovová mince.



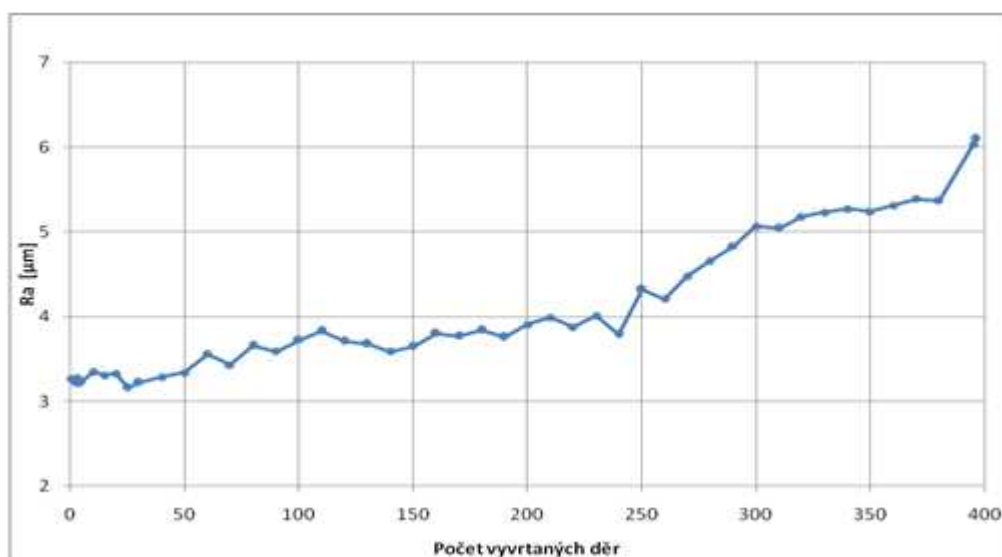
Obr. 54 Tvar odebrané třísky: A) vyvrtáno 5 děr, B) vyvrtáno 85 děr, C) vyvrtáno 310 děr, D) vyvrtáno 395 děr

### 6.2.3 Grafy popisující změnu hodnot sledovaných parametrů v průběhu experimentu

V grafech byla zobrazena změna hodnot sledovaných parametrů v závislosti na čase (počtu vyvrtaných děr):

- průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu –  $R_a$ ,
- velikost otupení –  $VB_H$ ,  $VB_P$ ,  $VL_V$ ,
- posuvová síla,
- krouticí moment.

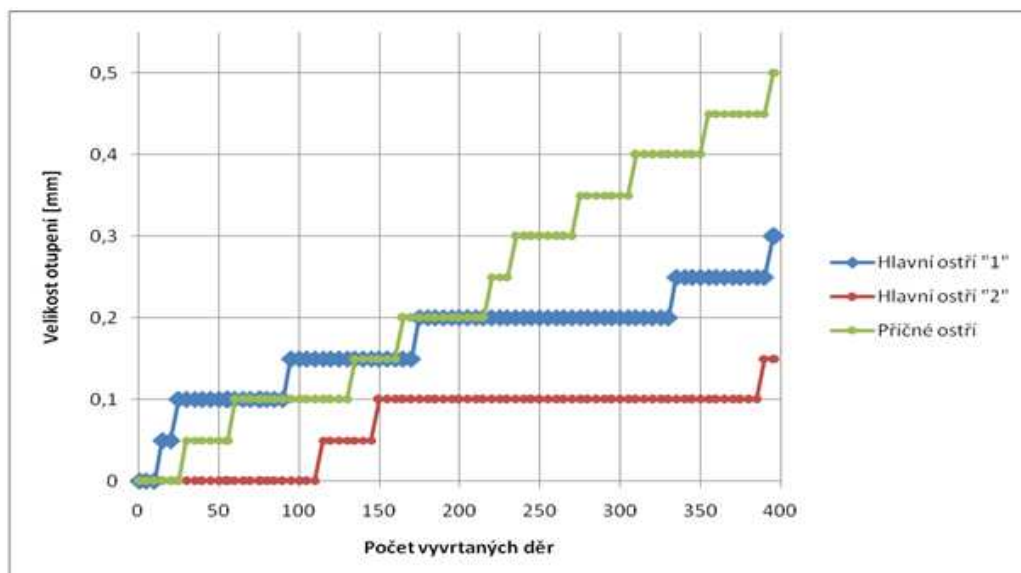
- Graf průměrné aritmetické úchylky posuzovaného profilu –  $R_a$



Graf 3. Průběh  $R_a$  v závislosti na počtu vyvrtaných děr

Z grafu 3 lze vyčíst, že otupení vrtáku do cca 250. díry mělo minimální vliv na velikost hodnoty  $R_a$ . Dále je z grafu patrné, že největší vliv na hodnotu  $R_a$  mělo lavinové „otupení“ na vedlejším ostří, které vzniklo při vrtání 395. díry.

- Graf velikosti otupení na hlavním ( $VB_H$ ) a příčném ostří ( $VB_P$ )

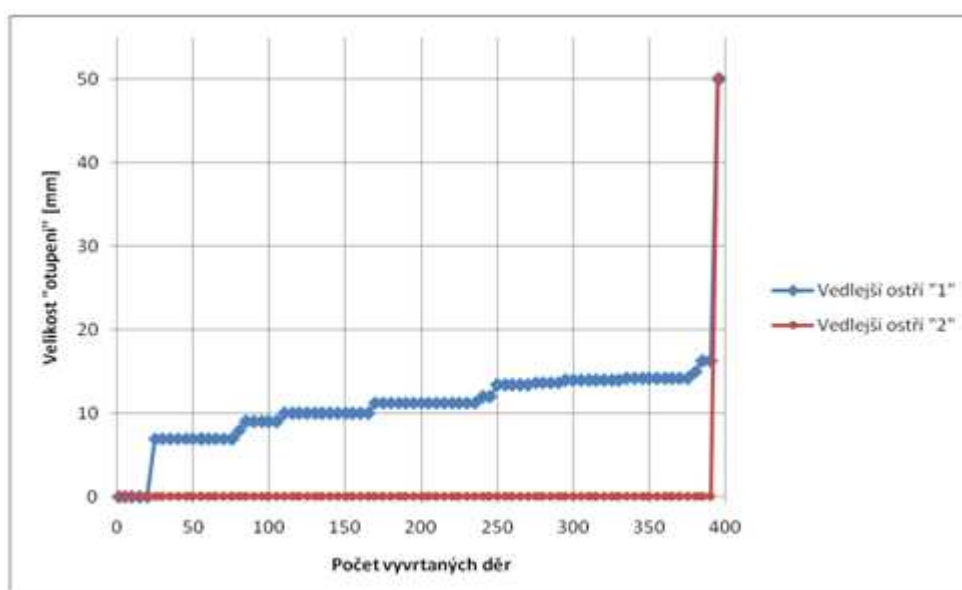


Graf 4. Změna velikosti otupení  $VB_H$ ,  $VB_P$  v závislosti na počtu vyvrtaných děr

Z grafu 4 lze vyčíst, že velikost otupení na příčném ostří se zvyšovala téměř pravidelně v průběhu celého experimentu. To je možné říci i o změně velikosti otupení na prvním hlavním ostří. Z grafu je dále patrné, že druhé hlavní ostří bylo to, které odebíralo materiál podstatně méně, a proto jeho velikost otupení rostla pomaleji.



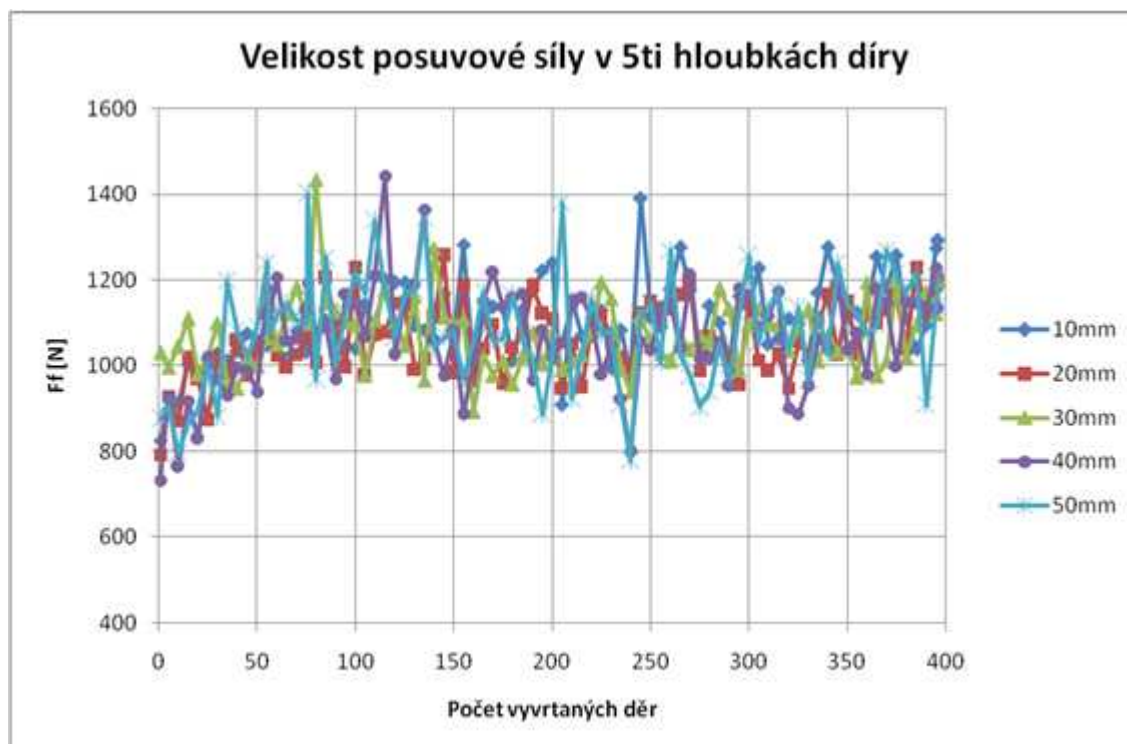
- Graf velikosti „otupení“ na vedlejším ostří (VL<sub>V</sub>)



Graf 5. Velikost „otupení“ vedlejšího ostří (VL<sub>V</sub>) v závislosti na počtu vyvrtaných děr

Graf 5 ukazuje změnu velikosti „otupení“ na vedlejším ostří vrtáku v průběhu celého experimentu. V grafu je vidět radikální změna velikosti „otupení“ obou vedlejších ostří, která byla naměřena po vyvrtání 395. díry.

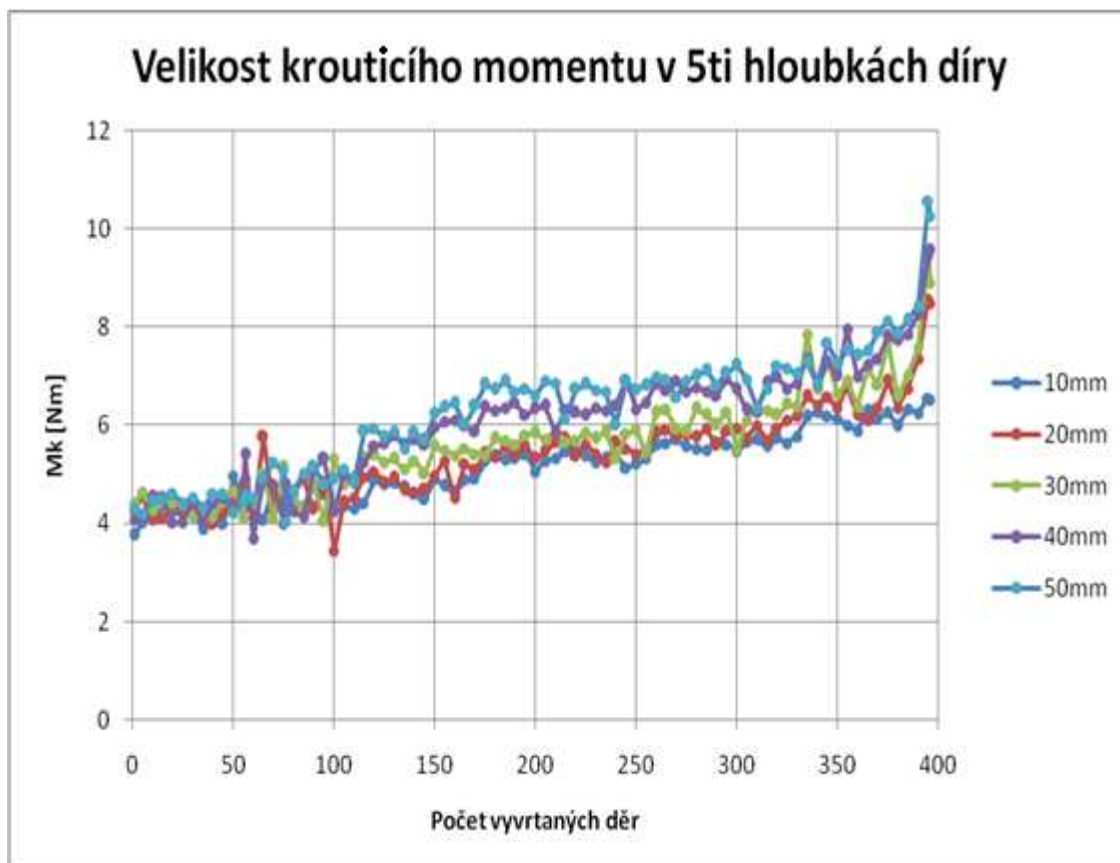
- Graf posuvové síly (F<sub>f</sub>)



Graf 6. Velikost posuvové síly v závislosti na počtu vyvrtaných děr

Naměřené hodnoty posuvové síly (graf 6) nevykazovaly v průběhu experimentu žádnou pravidelnost. Vliv některého ze sledovaných parametrů na tuto hodnotu nebyl zpozorován.

- Graf krouticího momentu ( $M_k$ )



Graf 7. Velikost krouticího momentu v závislosti na počtu vyvrtaných děr

Graf 7 znázorňuje růst hodnot krouticího momentu, který byl způsoben zvyšujícím se otupením vrtáku v průběhu experimentu. Z grafu je patrné, že hodnota krouticího momentu nebyla při vrtání jednoho otvoru konstantní a se zvětšující se hloubkou vrtáku v díře její hodnota rostla. Dále lze vidět skokový růst hodnot při vrtání 395. díry. Příčinou toho bylo lavinové opotřebení, které vzniklo na vedlejším ostří vrtáku.

## 7. Programování PLC

### 7.1 Zvolení řídicí veličiny pro PLC program a stanovení mezních stavů pro obráběcí proces vrtání

Jako řídicí veličinu pro PLC program bylo možné navrhnout dva parametry, které byly během experimentu měřeny, a to krouticí moment a posuvovou sílu. Z naměřených hodnot a z nich vytvořených grafů (kapitola 6.2) bylo patrné, že jako hlavní řídicí veličinu bude nejvhodnější zvolit krouticí moment, protože tento parametr oproti posuvové síle v průběhu měření rostl se zvyšujícím se otupením vrtáku. Hodnota krouticího momentu vykazovala značný rozdíl mezi novým a otupeným vrtákem. Oproti tomu posuvová síla vykazovala určitý nárůst hodnot pouze v začátku měření (do vyvrtání cca 70ti děr). Poté byly hodnoty podobné a nevykazovaly žádný rozdíl, tedy bylo nemožné z nich určit vyhovující meze pro PLC program.

Dále bylo zapotřebí určit pro PLC program tři mezní stavy. Každý mezní stav určoval, jak konkrétně byl vrták otupen a zároveň každá velikost otupení odpovídala naměřené hodnotě krouticího momentu. První mezní stav odpovídal vyhovujícímu otupení vrtáku, druhý mezní stav odpovídal uspokojivému otupení vrtáku a třetí mezní stav odpovídal nevyhovujícímu otupení vrtáku pro obráběcí proces.

Návrh mezních stavů pro proces vrtání:

- pro *stav vyhovující* byl stanoven rozsah velikosti krouticího momentu  $M_k = 3,76 \div 7,2 \text{ Nm}$ , tomu odpovídalo rozmezí otupení na hlavním ostří  $VB_H = 0 \div 0,2 \text{ mm}$ , na příčném ostří  $VB_P = 0 \div 0,4 \text{ mm}$  a na vedlejším ostří  $VL_V = 0 \div 14 \text{ mm}$ , vyvrtáno 330 děr,
- pro *stav uspokojivý* byl stanoven rozsah velikosti krouticího momentu  $M_k = 7,2 \div 8,49 \text{ Nm}$ , tomu odpovídalo rozmezí otupení na hlavním ostří  $VB_H = 0,2 \div 0,25 \text{ mm}$ , na příčném ostří  $VB_P = 0,4 \div 0,45 \text{ mm}$  a na vedlejším ostří  $VL_V = 14 \div 14,2 \text{ mm}$ , vyvrtáno 394 děr,
- pro *stav nevyhovující* byla stanovena velikost krouticího momentu  $M_k \geq 8,5 \text{ Nm}$ , tomu odpovídalo otupení na hlavním ostří  $VB_H \geq 0,3 \text{ mm}$ , na příčném ostří  $VB_P \geq 0,5 \text{ mm}$  a na vedlejším ostří v tento okamžik vzniklo tzv. lavinové opotřebení, vyvrtáno 395 děr.

### 7.2 Převod fyzikálních veličin na velikost napětí

Každá hodnota fyzikální veličiny změřená pomocí tenzometrického dynamometru odpovídala hodnotě napětí na vstupu do PLC Siemens LOGA! 0BA5, proto k naprogramování PLC a stanovení mezních hodnot napětí bylo zapotřebí zjistit, která

velikost napětí odpovídá konkrétní hodnotě krouticího momentu. To bylo provedeno během jednotlivých měření připojením voltmetru na výstup zesilovače tenzometrického dynamometru. Bylo zjištěno, že hodnota krouticího momentu 1Nm odpovídá napětí o velikosti 0,051V.

Po přepočtu hodnot krouticího momentu byly stanoveny mezní napěťové stavy pro PLC na tyto hodnoty napětí:

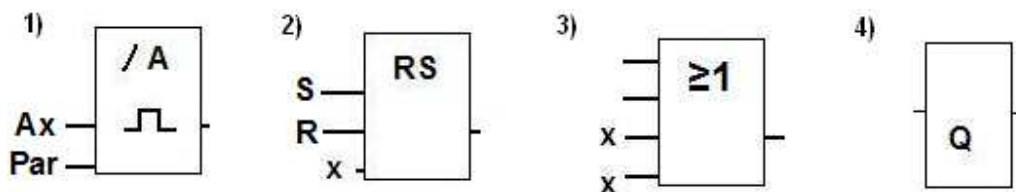
- *stav vyhovující* – krouticí moment v rozsahu  $M_k = 3,76 \div 7,2$  Nm odpovídá napěťovému stavu v rozmezí  $0 \div 0,37$  V – svítí zelené světlo,
- *stav uspokojivý* – krouticí moment v rozsahu  $M_k = 7,2 \div 8,49$  Nm odpovídá napěťovému stavu v rozmezí  $0,37 \div 0,42$  V – svítí oranžové světlo,
- *stav nevyhovující* – krouticí moment  $M_k \geq 8,5$  Nm odpovídá napětí přesahující velikost 0,42 V – svítí červené světlo.

### 7.3 Vytvoření a simulace programu pomocí softwaru Logo! Soft Comfort V6.0

První krok k naprogramování PLC bylo samotné vytvoření programu. Program měl zaručit, aby přístroj fungoval jako monitorizační zařízení pro obráběcí proces vrtání. To znamenalo, že barevný signál, který byl připojen na výstupy PLC (výstupy značeny Q1, Q2, Q3), nám bude signalizovat, kdy je vrták „neotupen“ (svítí zelené světlo, výstup Q1), kdy je „částečně otupen“ (svítí oranžové světlo, výstup Q2) a kdy je otupen tak, že je potřeba jej vyměnit (svítí červené světlo, výstup Q3). Tedy pro program bylo zapotřebí tří mezních stavů (kapitola 7.2). Pro vytvoření programu byl použit programovací jazyk funkčních bloků (kapitola 3.9.3). Výhodou bylo, že tento jazyk v softwaru umožňoval výběr z velkého počtu funkčních bloků (analogové nebo digitální). Pomocí softwaru byly bloky sestaveny a vytvořily tak funkční zapojení PLC programu.

Velkou předností použití softwaru LOGO! Soft Comfort V6.0 bylo vytváření programu přehledněji a snadněji než ruční programování na samotném PLC Siemens LOGO! 0BA5. Vytvořený program bylo hlavně možné simulovat a ověřit si jeho správnou funkčnost.

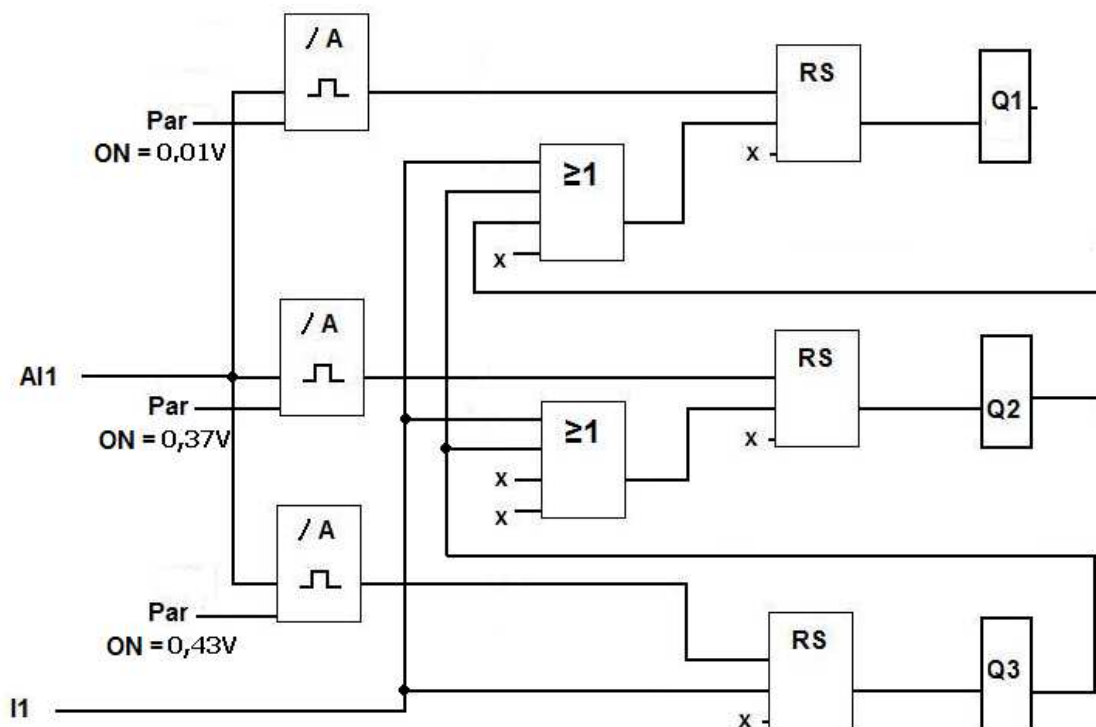
V programu byly použity tyto funkční bloky (obr. 55):



Legenda: 1) analogový spínač, 2) samodržné relé, 3) základní logická funkce OR, 4) analogový výstup z PLC

Obr. 55 Použité funkční bloky v programu

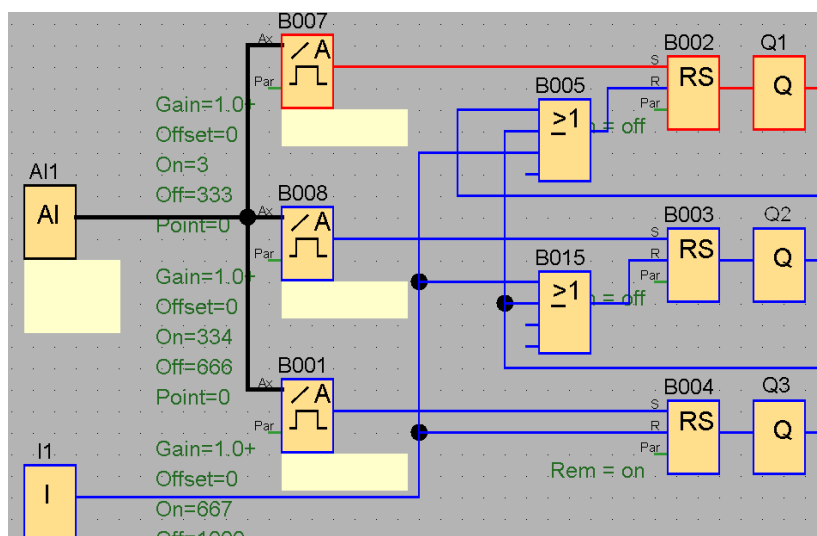
Konečné sestavení funkčních bloků v programu je schematicky znázorněno na obr. 56.



Obr. 56 Schéma zapojení funkčních bloků

Vytvořený program pro řízení obráběcího procesu vrtání vyhodnocoval velikost analogové výstupní hodnoty napětí (napětí odpovídalo hodnotě krouticího momentu) z tenzometrického dynamometru. Výstup ze zesilovače signálu tenzometrického dynamometru byl přiveden na analogový vstup AI1 (obr. 60) logického automatu Siemens LOGO! 0AB5. Na vstup logického automatu I1 byl připojen reset, který měl funkci vynulování hodnot ve vytvořeném programu. Dále na výstupní hodnoty Q1, Q2, Q3, které vedly z logického automatu Siemens LOGO! 0AB5, byly připojeny diody. Diody zobrazovaly formou rozsvícení nebo zhasnutí mezní stavy obráběcího procesu vrtání (kapitola 7.1).

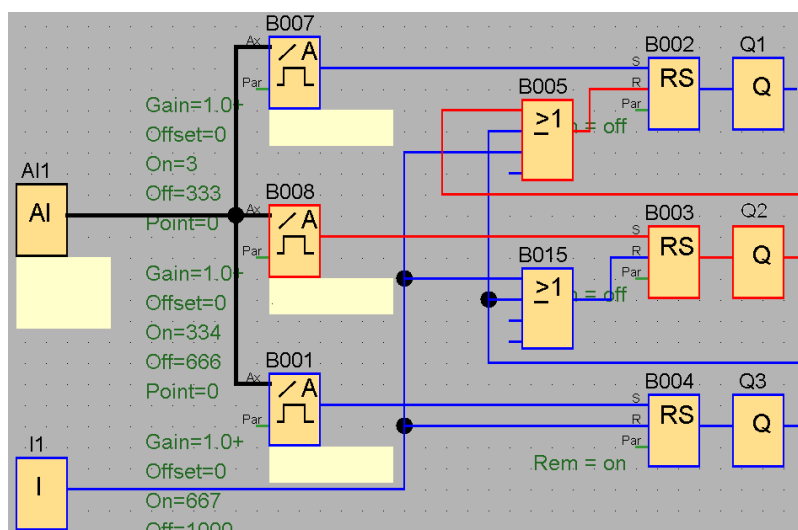
Na obr. 57 je vidět sepnutí výstupu Q1 díky simulaci v softwaru Logo! Soft Comfort V6.0. Výstup Q1 rozsvítil zelené světlo. To znamenalo, že obráběcí proces vrtání pracuje ve zcela vyhovujícím stavu. Tomuto stavu odpovídalo rozmezí napěťových hodnot na výstupu ze zesilovače tenzometrického dynamometru  $0 \div 0,37 \text{ V}$ .



Legenda: modrý drát stav vypnut, červený drát stav zapnut

Obr. 57 Sepnutí výstupu Q1 v softwaru Logo! Soft Comfort V6.0

Na obr. 58 je vidět sepnutí výstupu Q2 díky simulaci v softwaru Logo! Soft Comfort V6.0. Výstup Q2 rozsvítil oranžové světlo a zhasl zelené. To znamenalo, že obráběcí proces vrtání pracuje v uspokojivém stavu. Tomuto stavu odpovídalo rozmezí napěťových hodnot na výstupu ze zesilovače tenzometrického dynamometru  $0,37 \div 0,42$  V. Oranžové světlo signalizovalo obsluze stroje, že je potřeba obráběcí proces kontrolovat.

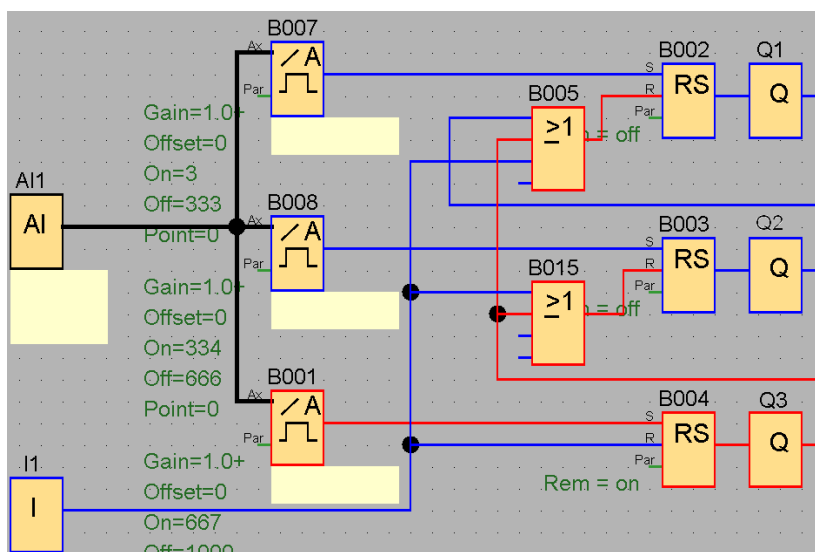


Legenda: modrý drát stav vypnut, červený drát stav zapnut

Obr. 58 Sepnutí výstupu Q2 v softwaru Logo! Soft Comfort V6.0

Na obr. 59 je vidět sepnutí výstupu Q3 díky simulaci v softwaru Logo! Soft Comfort V6.0. Výstup Q3 rozsvítil červené světlo a zhasl oranžové. To znamenalo, že obráběcí proces vrtání začal pracovat v nevyhovujícím stavu. Tomuto stavu odpovídala

napětová hodnota na výstupu ze zesilovače tenzometrického dynamometru překračující 0,42 V. Červené světlo signalizovalo obsluze stroje, že je potřeba ukončit obráběcí proces a vyměnit nástroj.

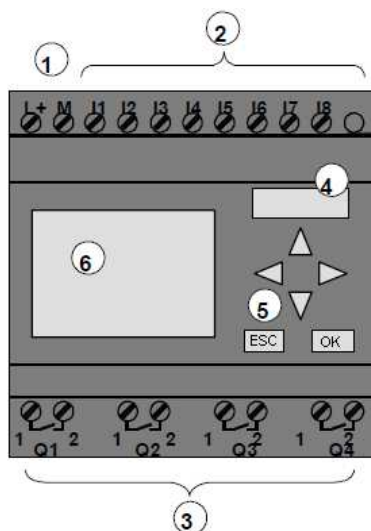


Legenda: modrý drát stav vypnut, červený drát stav zapnut

Obr. 59 Sepnutí výstupu Q3 v softwaru Logo! Soft Comfort V6.0

#### 7.4 Postup ručního naprogramování PLC Siemens LOGO! 0BA5

Pro vložení programu do PLC Siemens LOGO! 0BA5 byly možné dvě varianty, buď přímé vložení programu vytvořeného v softwaru Logo! Soft Comfort V6.0, nebo ruční vložení programu. První případ byl zřejmě jednodušší, ale pro nahrání programu z počítače do PLC byl potřeba kabel, který bohužel nebyl k dispozici. Proto byl program vložen ručně a to pomocí ovládacího panelu umístěného přímo na PLC (obr. 60).



Legenda: 1) Zdroj, 2) Vstupy (I7 = AI1, I8 = AI2), 3) Výstupy, 4) Sloty modulu s krytem, 5) Řídicí panel, 6) LCD

Obr. 60 Ovládací panel Siemens LOGO! 0BA5 [26]

Do logického automatu byl program ručně zadán dle blokového schématu zobrazeného na obr. 56. Postup programování:

- Zapnutí LOGO!

Po zapojení přístroje LOGO! do elektrické sítě, byl sepnut spínač do polohy ON (obr. 62) a ukázala se na LCD úvodní obrazovka s nápisem „No Program, Press ESC“.

- Editace nového programu

Stisknutím tlačítka ESC bylo LOGO! přepnuto do programovacího módu a objevilo se hlavní menu. Ve zobrazeném menu bylo kurzorem najeto na „Program“ a tato volba byla potvrzena tlačítkem OK. V nově zobrazeném okně byla kurzorem vybrána a potvrzena položka „Edit“. Dále v nově zobrazeném okně byla kurzorem vybrána a potvrzena položka „Edit Prg“.

- Program pro výstup Q1

Princip zapisování programu byl od výstupu ke vstupu. Po výše uvedeném postupu bylo zobrazeno okno, ve kterém byl zobrazen výstup „Q1“. Výstup „Q1“ byl zvolen stisknutím tlačítka OK. Pomocí šipek  $\leftrightarrow$  se najelo kurzorem vlevo, stisknutím tlačítka OK se objevila nabídka logických funkcí a zde byla vybrána položka „SF“ (speciální funkce). Ta byla potvrzena tlačítkem OK. Poté byla zobrazena ikonová nabídka speciálních bloků. Mačkáním šipky  $\updownarrow$ , byl vybrán blok samodržného relé (obr. 55) a byl potvrzen tlačítkem OK. Pak byl kurzor šipkami  $\updownarrow\leftrightarrow$  posunut na vstup „R“, stisknutím tlačítka OK se objevila nabídka logických funkcí, zde byla vybrána položka „GF“ (základní funkce) a byla potvrzena tlačítkem OK. Dále posunutím kurzoru  $\updownarrow$  byla vybrána logická funkce OR (obr. 55) a potvrzena byla tlačítkem OK. Najetím kurzoru na první dva vstupy byla zvolena položka „CO“ (konektor) a posunutím kurzoru šipkami  $\updownarrow$  byl na jeden vstup vybrán výstup Q2 a na druhý vstup vybrán výstup Q3, oba výstupy byly potvrzeny tlačítkem OK. Poté u samodržného relé byl ještě nastaven vstup „S“, zde byla vybrána položka „SF“, která byla potvrzena tlačítkem OK. Najetím kurzoru šipkami  $\updownarrow$  a stisknutím tlačítka OK byl vybrán analogový spínač (obr. 55). Posunutím kurzoru na první vstup „Ax“ byla zvolena položka „CO“ a následně šipkami  $\updownarrow$  vybrána funkce AI1, ta byla potvrzena tlačítkem OK. Na druhý vstup „Par“ byla po stisknutí tlačítka OK nastavena hodnota 0,01 V (hodnota, při kterém byl výstup Q1 zapnut), která byla potvrzena tlačítkem OK. Tímto postupem byl naprogramován výstup Q1.

- Program pro výstup Q2

Pro editaci druhého výstupu byl zvolen obdobný způsob. Princip zapisování programu byl opět od výstupu ke vstupu. V zobrazeném okně byl po-



pomocí šipek  $\uparrow$  vybrán druhý výstup Q2 a potvrzen stisknutím tlačítka OK. Pomocí šipek  $\leftrightarrow$  se najelo kurzorem vlevo, stisknutím tlačítka OK se objevila nabídka logických funkcí a zde byla vybrána položka „SF“. Ta byla potvrzena tlačítkem OK. Poté byla zobrazena ikonová nabídka speciálních bloků. Mačkáním šipky  $\uparrow$ , byl vybrán blok samodržného relé a byl potvrzen tlačítkem OK. Pak byl kurzor šipkami  $\uparrow\leftrightarrow$  posunut na vstup „R“, stisknutím tlačítka OK byl vybrán výstup Q3. Pak byl ještě nastaven vstup „S“, zde byla vybrána položka „SF“, která byla potvrzena tlačítkem OK. Najetím kurzoru šipkami  $\uparrow$  a stisknutím tlačítka OK byl vybrán analogový spínač. Posunutím kurzoru na první vstup „Ax“ byla zvolena položka „CO“ a následně šipkami  $\uparrow$  vybrána funkce AI1, ta byla potvrzena tlačítkem OK. Na druhý vstup „Par“ byla po stisknutí tlačítka OK nastavena hodnota 0,37 V (hodnota, při kterém byl výstup Q2 zapnut), která byla potvrzena tlačítkem OK. Tímto postupem byl naprogramován výstup Q2. Znamenalo to, že když přivedená hodnota AI1 překročí napětí 0,37 V, rozsvítí se oranžové světlo a zelené světlo zhasne.

- Program pro výstup Q3

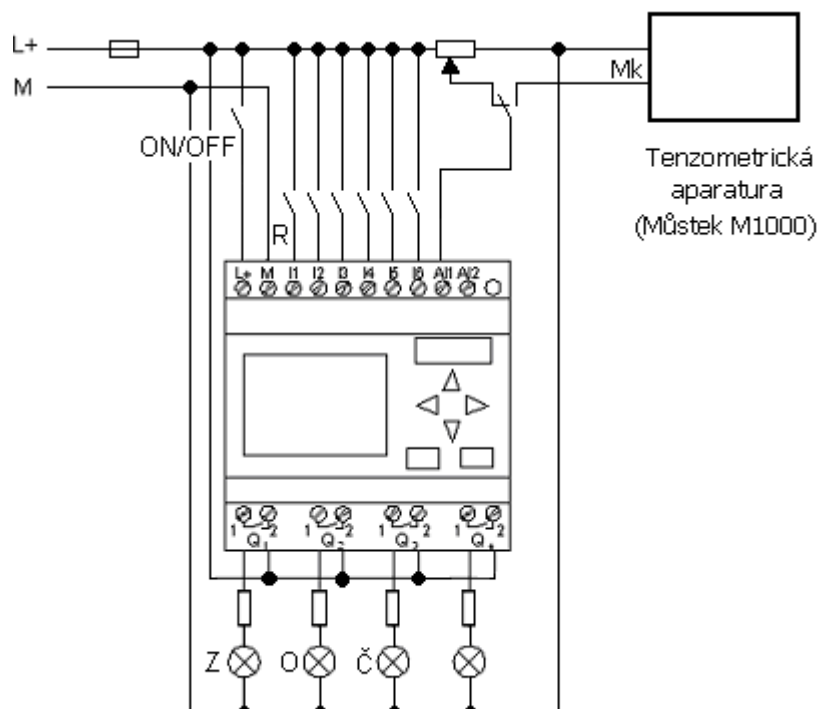
Pro editaci třetího výstupu byl zvolen opět obdobný způsob. Princip zapisování programu byl opět od výstupu ke vstupu. V zobrazeném okně byl pomocí šipek  $\uparrow$  vybrán třetí výstup Q3 a potvrzen stisknutím tlačítka OK. Pomocí šipek  $\leftrightarrow$  se najelo kurzorem vlevo, stisknutím tlačítka OK se objevila nabídka logických funkcí a zde byla vybrána položka „SF“. Ta byla potvrzena tlačítkem OK. Poté byla zobrazena ikonová nabídka speciálních bloků. Mačkáním šipky  $\uparrow$  byl vybrán blok samodržného relé a byl potvrzen tlačítkem OK. Pak byl kurzor šipkami  $\uparrow\leftrightarrow$  posunut na vstup „R“, stisknutím tlačítka OK se objevila nabídka logických funkcí, zde byla vybrána položka „CO“ a byla potvrzena tlačítkem OK. Pomocí šipek  $\uparrow$  byl vybrán digitální vstup I1, který měl funkci restartujícího prvku po ukončení obráběcího procesu vrtání. Poté u samodržného relé byl ještě nastaven vstup „S“, zde byla vybrána položka „SF“, která byla potvrzena tlačítkem OK. Najetím kurzoru šipkami  $\uparrow$  a stisknutím tlačítka OK byl vybrán analogový spínač. Posunutím kurzoru na první vstup „Ax“ byla zvolena položka „CO“ a následně šipkami  $\uparrow$  vybrána funkce AI1, ta byla potvrzena tlačítkem OK. Na druhý vstup „Par“ byla po stisknutí tlačítka OK nastavena hodnota 0,43 V (hodnota, při kterém byl výstup Q3 zapnut), která byla potvrzena tlačítkem OK. Tímto postupem byl naprogramován výstup Q3. Znamenalo to, že když přivedená hodnota AI1 překročí napětí 0,43 V, rozsvítí se červené světlo a oranžové světlo zhasne.

- Spuštění programu

V hlavním menu byla posunutím kurzoru ↑ vybrána položka „Start“ a stisknutím tlačítka OK došlo ke spuštění programu.

## 8. Praktické ověření systému řízení

### 8.1 Připojení PLC k tenzometrické aparatuře



Obr. 61 Schéma připojení Logo! 0BA5 k tenzometrické aparatuře  
(Z – zelené dioda, O – oranžová dioda, Č – červená dioda, R – reset)

Logický automat Logo! 0BA5 byl zapojen dle schématu na obrázku 61. Logo! 0BA5 bylo napájeno transformátorem, který byl zapojen do sítě. Tento transformátor převáděl střídavé napětí 230V na stejnosměrné napětí o hodnotě 12V. Napájecí napětí pro logický automat bylo připojeno na vstup L+ a na vstup M bylo přivedeno uzemnění. Pro bezporuchový chod logického automatu byla před vstupem L+ připojena trubičková pojistka F1A250V, která byla umístěna v pouzdře. Dále na toto napájení byl připojen vypínač (obr. 62), který sloužil k zapnutí (vypínač v poloze ON) a vypnutí (vypínač v poloze OFF) logického automatu. Na každý ze vstupů I1 až I6 byl připojen jeden vypínač. Z toho vstup I1 sloužil jako reset pro vytvořený program v PLC (viz kapitola 7.3), ostatní vypínače pro experiment nebyly využity.

Na analogový vstup logického automatu AI1 byl připojen přepínač, který umožňoval přivádět buď simulované napětí z potenciometru, nebo výstupní napětí ze zesilovače signálu (můstku M1000) tenzometrického dynamometru. Toto napětí představovalo krouticí moment, který byl naměřen pomocí tenzometrického dynamometru.

Na výstupy Q1, Q2, Q3 a Q4 byly dle obr. 61 připojeny rezistory a svítivé diody, a to vždy na pozici jedna. Na pozici dva bylo z transformátoru přivedeno napájecí napětí. Diody svítily podle pokynů programu vytvořeného v PLC (viz kapitola 7.2). Dioda na výstupu Q4 nebyla pro experiment využita.

V rámci řešení této práce bylo vyrobeno řídicí zařízení (obr. 62).



Obr. 62 Vyrobené řídicí zařízení

## 8.2 Praktické ověření PLC

Před praktickým ověřením správné funkčnosti systému řízení pro proces vrtání bylo potřeba zprovoznit veškerá zařízení použitá při samotných experimentech dle kapitoly 5.9. Dále bylo zapnuto PLC hlavním vypínačem.

Pro praktické ověření byly připraveny dva vrtáky, každý s různou geometrií břitu. Prvním nástrojem byl nový vrták s nulovým otupením, který představoval vyhovující stav procesu vrtání. Druhým nástrojem byl otupený vrták (obr. 53), který představoval nevyhovující stav procesu vrtání. Třetí vrták, který by představoval uspokojivý stav procesu vrtání, nebyl při praktickém ověření zastoupen. Bylo tomu tak z důvodu časové náročnosti a značného objemu materiálu, který by byl spotřebován k dosažení otupení vrtáku, jež by odpovídal uspokojivému stavu.

Správná funkčnost řídicího systému byla ověřena celkem pětkrát. Pro dokonalé ověření byly vrtáky představující stavy vrtání použity v různém pořadí.

Při vrtání neotupeným vrtákem, který zastupoval stav vyhovující, nedošlo ke komplikacím a svítila po celou dobu vrtání pokaždé pouze zelená dioda. Ověření vyhovujícího stavu proběhlo podle předpokladů.

Během vrtání otupeným vrtákem zastupující stav nevyhovující, svítila zelená dioda do cca 20ti mm hloubky vrtané díry. V této hloubce zhasla zelená dioda, blikla oranžová a hned poté se rozsvítila dioda červená. Ta svítila do konce procesu. Tento průběh rozsvícení diod se pokaždé opakoval a odpovídal hodnotám krouticího momentu, které byly naměřeny během experimentu. Ověření nevyhovujícího stavu proběhlo podle předpokladů.

## Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit systém řízení obráběcího procesu vrtání pomocí vhodně vytvořeného programu v PLC zařízení.

Za tímto účelem byl uskutečněn experiment vrtání na radiální vrtačce VR 4. Vrtaným materiálem byla ocel 14 220. Vrtalo se šroubovým vrtákem z rychlořezné oceli s kuželovou stopkou ČSN 221140 o  $\varnothing$  14,5 mm. Pro experiment byly nejvhodnější řezné podmínky zjištěny ve zkušebním procesu a na základě toho byly zvoleny otáčky  $n = 710 \text{ min}^{-1}$ , řezná rychlost  $v_c = 32,34 \text{ m.min}^{-1}$  a posuv  $f = 0,025 \text{ mm.ot}^{-1}$ .

Postup experimentu byl následující:

- změření krouticího momentu a posuvové síly pomocí tenzometrického dynamometru,
- změření velikosti opotřebení vrtáku pomocí nástrojové lupy Brinell,
- kontrola průměru vyvrtané díry pomocí třídotekového dutinoměru,
- změření jakosti obrobené plochy pomocí drsnoměru Mitutoyo SV 2000.

Experiment byl ukončen v okamžiku (díra č. 395), kdy došlo zřejmě vlivem vysokého tepelného a mechanického zatížení k plastické deformaci na vedlejším ostří vrtáku. Při vrtání s takto otupeným vrtákem byla hodnota krouticího momentu přibližně o 100% větší než při použití nového, neotupeného nástroje.

Po zpracování naměřených dat byl zvolen krouticí moment hlavní řídicí veličinou pro monitorování obráběcího procesu. Na základě získaných hodnot krouticího momentu byly navrženy tři mezní stavy, které zároveň popisovaly proces vrtání z hlediska otupení vrtáku (stav vyhovující, uspokojivý a nevyhovující). Poté byl vytvořen program řídicího systému PLC, který určoval, v jakém stavu proces vrtání právě pracuje. Pro signalizaci jednotlivých stavů obráběcího procesu sloužily tři diody, které byly připojeny na výstup PLC. Rozsvícení zelené diody představovalo stav vyhovující, oranžové stav uspokojivý a červené stav nevyhovující.

Správná funkčnost řídicího systému PLC byla prakticky ověřena. Tento experiment prokázal, že monitorizační zařízení z PLC, které funguje na principu vyhodnocování napěťového signálu odpovídající velikosti krouticího momentu, je schopné řídit obráběcí proces vrtání. Tenzometrický dynamometr s vyrobeným řídicím zařízením z PLC by určitě našel vhodné uplatnění v hromadné výrobě.

Pro lepší funkčnost a vyhodnocování stavů procesu vrtání by bylo vhodné do budoucna opatřit řídicí systém zařízením, které by monitorovalo hloubku vrtání. Hodnota krouticího momentu totiž nebyla při vrtání jednoho otvoru konstantní a se zvětšující se hloubkou vrtáku v díře její velikost rostla. Program v PLC by pak spolupracoval s tímto zařízením a lépe pak vyhodnocoval jednotlivé stavy obrábění.

## Seznam použité literatury

- [1] ŘASA, J., GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3 – 1. díl – Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 1. vyd. Praha: Scientia, spol. s r.o., 2000. 256 s. ISBN 80-7183-207-3.
- [2] *Prezentace nástrojů*. [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, katedra obrábění a montáže, [cit. 20. února 2011]. Dostupné na: <http://www.kom.tul.cz>.
- [3] JURKO, J., LUKOVICS, I. *Vřtanie: technologická metóda výroby dier*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2007. 190 s. ISBN 8073184885.
- [4] KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM Brno, s. r. o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [5] LIEMERT, G. DRÁBEK, F. ONDRA, J. VAVŘÍK, I. *Obrábění*. Praha: SNTL, 1974. 351 s.
- [6] KOČMAN, K., *Speciální technologie: obrábění I*. 3., přeprac. a dopl. vyd. Brno: CERM, 2004. 227 s. ISBN 8021425628.
- [7] *Programovatelné logické automaty*. [online]. Praha: Vysoká škola chemicko – technologická v Praze, březen 2009. [-]. Dostupné na: <http://uprt.vscht.cz>.
- [8] ŠMEJKAL, F., MARTINÁSKOVÁ, M. *PLC a automatizace*. 1. vyd., Praha: BEN, 2007. 222 s. ISBN 978-80-86056-58-6.
- [9] POPELKA, J., *Řídicí systémy firmy Siemens a jejich využití v průmyslové automatizaci. [Diplomová práce]*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2007. 82 s.
- [10] MATYÁŠ, R. *Využití signálu z dynamometru KISTLER pro řízení brusky BPH 320-A. [Diplomová práce]*. Liberec, TU v Liberci, 2009. 73 s.
- [11] FRÝDA, D. *Využití programovatelného řídicího automatu PLC pro monitorizaci obrábění na frézce FNG32. [Bakalářská práce]*. Liberec, TU v Liberci, 2010. 84 s.
- [12] BABICA, K., *Vliv ostření vrtáků a vyvrtávacích nástrojů na doprovodní jevy procesu obrábění. [Diplomová práce]*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2010. 73 s.
- [13] *Měření sil, momentů, indikace okamžité polohy*. [online]. [cit. 1. října 2011]. Dostupné na: [http://www.337.vsb.cz/materialy/experimentalni\\_mechanika/MERENI\\_SIL.pdf](http://www.337.vsb.cz/materialy/experimentalni_mechanika/MERENI_SIL.pdf).

- [14] ROBENEK, J., *Návrh PLC očima vývojáře – 1. Část* [online]. [cit. 1. října 2011]. Dostupné na: <http://hw.cz/teorie-a-praxe/art3657-navrh-plc-ocima-vyvojare-1-cast.html> .
- [15] VONDRA, Z., *Základy programování PLC*. [online]. Praha: Střední průmyslová škola elektrotechnická Praha 2, Ječná 20, prosinec 2006. [cit. 1. října 2011]. Dostupné na: [http://www.spsejecna.org/skola/documents/Vysledky\\_projektu/PLC\\_zakl.pdf](http://www.spsejecna.org/skola/documents/Vysledky_projektu/PLC_zakl.pdf) .
- [16] Kochaniček, L., *Programovací jazyky pro PLC*. [online]. [cit. 1. října 2011]. Dostupné na: <http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=3905&docGroup=179&cmd=0&instance=1> .
- [17] *Programování PLC podle normy IEC 61 131-3 v prostředí Mosaic*. [online]. listopad 2007. [cit. 1. října 2011]. Dostupné na: [http://tecomat.com/wpimages/other/DOCS/cze/TXV00321\\_01\\_Mosaic\\_ProgIEC\\_cz.pdf](http://tecomat.com/wpimages/other/DOCS/cze/TXV00321_01_Mosaic_ProgIEC_cz.pdf) .
- [18] ŠTRAJBL, J., *Obráběcí stroje 1974*. Praha: SNTL, 1975. 603 s.
- [19] HALVA, T., *clanek\_logo\_OBA5\_cz*. 1. vyd. Brno: Siemens, 2005. [cit. 26. července 2005]. Dostupné na: <http://www.siemens.cz/micro> .
- [20] DRÁB, V. a kolektiv, *Technologie I - návody ke cvičení*. Liberec: VŠST, 1983. 177 s.
- [21] BENEŠ, P., CHLEBNÝ, J., KRÁL, J., aj., *Automatizace a automatizační technika. III, Prostředky automatizační techniky*. Brno: CP Books, 2005. 280 s.
- [22] *Můstek M1000 – pozemní antény*. [online]. [cit. 1. října 2011]. Dostupné na: [http://www.ijisat.cz/index.php?page=shop.getfile&file\\_id=53&product\\_id=365&option=com\\_virtuemart&Itemid=2](http://www.ijisat.cz/index.php?page=shop.getfile&file_id=53&product_id=365&option=com_virtuemart&Itemid=2) .
- [23] *ADC1216*. [online]. Praha: ADICOM Praha spol. s r.o., [cit. 1. Října 2011]. Dostupné na: <http://www.mereni.cz/Download%5Cadc1216.pdf> .
- [24] *Příručka ADC1216*. [online]. Praha: ADICOM Praha spol. s r.o., [cit. 1. října 2011]. Dostupné na: <http://www.mereni.cz/Download%5Cadcman4.pdf> .
- [25] Beneš, J. a kolektiv, *Díleenské tabulky pro školu a praxi*. 1.vyd. ALBRA, 2009. 580 s. ISBN 80-7361-062-0.
- [26] *Logo! Vás vítá (manual)*. [online]. Siemens s.r.o., 07/2005. [cit. 1. října 2011]. Dostupné na: [http://www.fm.tul.cz/~milos.hernych/zlr/LOGO!\\_manual\\_OBA5\\_cz.pdf](http://www.fm.tul.cz/~milos.hernych/zlr/LOGO!_manual_OBA5_cz.pdf) .

- [27] *Drsnoměry měření jakosti povrchu*. [online]. Teplice: Mitutoyo Česko s.r.o., [cit. 1. Října 2011]. Dostupné na:  
<http://www.mitutoyo-czech.cz/cz/pdf/drsnomery.pdf> .
- [28] TICHÁ, Š., *Strojírenská metrologie část 1*. [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2004. [cit. 1. října 2011]. Dostupné na:  
<http://www.fs.vsb.cz/books/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf> .
- [29] *Průmyslové spektrum - Abbottova křivka*. [online]. [cit. 1. listopadu 2011]. Dostupné na : <http://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-spolehlivosti-soucasti-superfinisovanim.html> .
- [30] *Ruční měřidla*. [online]. Teplice: Mitutoyo Česko s.r.o., [cit. 1. listopadu 2011]. Dostupné na: <http://www.mitutoyo-czech.cz/pdf/katalog/cz/Rucni-meridla.pdf> .



## Seznam příloh

Příloha I.: Tabulky naměřených hodnot .....4 strany

Příloha II.: disk CD

## **Příloha I.**

	Krouticí moment $M_k$ [Nm] v hloubce:						Krouticí moment $M_k$ [Nm] v hloubce:				
č. díry	10mm	20mm	30mm	40mm	50mm	č. díry	10mm	20mm	30mm	40mm	50mm
1	3,76	4,23	4,42	4,09	4,3	200	5,05	5,31	5,84	6,34	6,61
5	4,01	4,57	4,63	4,15	4,2	205	5,28	5,48	5,71	6,4	6,9
10	4,14	4,07	4,26	4,58	4,47	210	5,33	5,65	5,89	5,86	6,85
15	4,35	4,1	4,43	4,51	4,5	215	5,46	5,73	5,66	6,32	6,13
20	4,24	4,38	4,4	4,02	4,6	220	5,48	5,39	5,69	6,26	6,73
25	4,18	4,26	4,39	4,03	4,41	225	5,39	5,61	5,85	6,2	6,84
30	4,27	4,39	4,12	4,5	4,53	230	5,23	5,42	5,73	6,35	6,72
35	3,89	4,12	4,21	4,02	4,33	235	5,31	5,25	5,87	6,29	6,68
40	4,41	3,99	4,13	4,43	4,57	240	5,38	5,65	5,32	6,41	6,02
45	4	4,22	4,45	4,53	4,6	245	5,14	5,53	5,82	6,93	6,87
50	4,96	4,43	4,66	4,22	4,21	250	5,2	5,42	5,91	6,33	6,74
55	4,31	4,83	4,1	4,72	4,47	255	5,32	5,5	5,43	6,46	6,81
56	4,46	4,91	4,68	5,4	4,58	260	5,59	5,84	6,26	6,86	7
60	4,31	4,1	4,41	3,69	4,48	265	5,63	5,91	6,32	6,71	6,94
65	4,09	5,76	4,98	4,89	4,94	270	5,7	5,79	5,93	6,9	6,58
70	4,73	4,26	4,11	4,76	5,24	275	5,57	5,8	5,87	6,68	6,91
75	4,39	4,5	5,19	4	5,07	280	5,52	5,76	6,34	6,77	7,01
76	4,44	4,06	4,66	4,83	4,02	285	5,49	5,93	6,2	6,69	7,12
80	4,46	4,62	4,4	4,25	4,65	290	5,66	5,59	6,01	6,6	6,83
85	4,36	4,91	4,33	4,12	5,03	295	5,61	5,88	6,28	6,94	7,06
90	4,75	4,29	4,82	5,08	5,15	300	5,47	5,94	5,5	6,73	7,23
95	4,59	4,82	4,06	5,31	4,8	305	5,65	5,74	6,1	6,31	6,94
100	4,23	3,45	5,32	4,25	4,9	310	5,7	6	6,38	6,27	6,36
105	4,34	4,43	4,81	5,01	5,1	315	5,56	5,69	6,29	6,87	6,74
110	4,31	4,52	4,93	4,82	4,84	320	5,73	5,94	6,2	6,98	7,21
115	4,42	4,94	5,34	5,24	5,87	325	5,64	6,1	6,42	6,75	7,16
120	4,87	5,05	5,4	5,58	5,93	330	5,77	6,17	6,37	6,85	7,03
125	4,79	4,85	5,25	5,62	5,76	335	6,17	6,59	7,85	7,34	7,28
130	4,82	4,93	5,31	5,79	5,88	340	6,27	6,41	6,73	6,82	6,85
135	4,73	4,7	5,1	5,63	5,52	345	6,18	6,57	7,3	7,28	7,68
140	4,59	4,63	5,28	5,7	5,84	350	6,14	6,35	6,62	7,01	7,26
145	4,48	4,71	5,02	5,59	5,7	355	6	6,81	6,91	7,96	7,54
150	4,91	4,97	5,56	5,96	6,23	360	5,89	6,2	6,38	7	7,42
155	4,76	5,28	5,49	6,07	6,37	365	6,32	6,1	7,14	7,24	7,5
160	4,62	4,52	5,38	6,1	6,45	370	6,12	6,35	6,83	7,35	7,9
165	4,87	5,21	5,53	5,98	6,01	375	6,28	6,93	7,69	7,81	8,13
170	4,9	5,1	5,42	5,88	6,4	380	5,98	6,36	6,59	7,73	7,87
175	5,26	5,43	5,38	6,37	6,84	385	6,33	6,74	7,02	7,85	8,14
180	5,37	5,35	5,73	6,29	6,73	390	6,24	7,36	7,58	8,25	8,43
185	5,29	5,56	5,68	6,35	6,89	395	6,55	8,57	9,46	9,42	10,56
190	5,31	5,4	5,6	6,46	6,68	396	6,52	8,49	8,9	9,56	10,26
195	5,42	5,6	5,8	6,21	6,74						

	Posuvová síla $F_f$ [N] v hloubce:						Posuvová síla $F_f$ [N] v hloubce:				
č. díry	10mm	20mm	30mm	40mm	50mm	č. díry	10mm	20mm	30mm	40mm	50mm
1	826,1	793,9	1031,5	733,9	876,7	200	1242,3	1106,7	1077,9	1018,9	1021,7
5	899,3	928,4	997,2	928,6	906,1	205	910,0	948,0	991,3	1054,9	1378,8
10	913,8	871,7	1045,4	764,9	796,5	210	1155,3	1050,8	1009,3	1139,4	923,7
15	1003,1	1021,8	1110,6	918,3	864,8	215	1069,2	949,4	1026,9	1160,2	1031,3
20	984,3	968,1	981,4	830,4	898,5	220	1071,1	1092,4	1079,4	1109,7	1156,7
25	1013,3	875,3	1018,7	1021,3	1002,6	225	1130,7	1120,2	1195,3	981,1	1073,7
30	1030,5	1017,6	1100,8	970,5	882,9	230	993,9	1072,0	1157,4	1044,9	1082,5
35	1013,7	982,5	962,2	931,2	1196,7	235	1084,4	1017,2	991,7	923,6	908,5
40	1034,5	1058,4	948,6	996,5	1081,0	240	975,4	988,7	940,7	800,4	778,7
45	1075,4	977,7	1015,8	989,7	1020,3	245	1390,9	1120,9	1117,1	1055,8	1120,9
50	1056,2	1033,5	1000,1	940,1	1093,0	250	1112,7	1151,4	1047,5	1037,4	1145,5
55	1047,6	1122,0	1065,7	1177,8	1242,5	255	1089,6	1109,1	1030,3	1134,9	1009,8
56	1129,2	1065,0	1156,6	1102,0	1077,1	260	1179,2	1131,7	1012,4	1144,8	1269,8
60	1047,6	1023,4	1050,4	1206,6	1118,4	265	1275,3	1164,7	1068,8	1040,8	1027,3
65	1014,2	997,9	1120,7	1059,3	1144,8	270	1177,2	1195,9	1038,6	1210,2	976,1
70	1081,6	1026,7	1183,4	1064,3	1106,4	275	1021,6	988,8	1071,2	1015,9	904,5
75	1033,0	1067,8	1118,2	1129,4	1101,7	280	1140,0	1066,2	1057,7	1017,0	939,5
76	1097,9	1072,3	1098,9	1193,4	1400,8	285	1100,1	1049,0	1180,8	1056,8	1049,5
80	1074,7	1006,8	1435,0	1078,3	968,9	290	1013,3	1019,8	1132,2	952,5	966,7
85	1104,1	1205,5	1147,0	1091,3	1253,0	295	1163,3	956,6	991,7	1182,5	1118,7
90	1063,1	1099,5	1126,5	970,0	1001,2	300	1137,1	1149,8	1096,5	1165,4	1256,8
95	1047,4	996,0	1103,3	1168,6	1126,6	305	1227,1	1013,9	1131,2	1091,5	1054,3
100	1038,7	1226,5	1096,0	1146,4	1216,1	310	1051,6	987,8	1099,8	1115,2	1132,9
105	1142,9	981,2	978,1	1067,5	1169,2	315	1063,8	1025,1	1094,7	1173,8	1172,1
110	1078,6	1073,9	1106,8	1208,0	1338,4	320	1111,6	948,8	1034,7	901,6	1042,5
115	1201,7	1077,5	1177,7	1443,4	1178,4	325	1098,4	1055,9	1091,6	889,0	1134,8
120	1194,0	1147,3	1103,4	1025,8	1067,5	330	1013,3	1019,8	1132,2	952,5	966,7
125	1195,3	1139,9	1047,4	1154,5	1170,1	335	1170,6	1102,2	1012,4	1061,2	1122,7
130	1093,4	991,2	1163,6	1189,4	1175,7	340	1275,3	1164,7	1068,8	1040,8	1027,3
135	1084,2	1018,6	967,8	1363,5	1343,5	345	1186,7	1025,7	1033,4	1192,6	1237,3
140	1111,0	1112,8	1275,0	1061,6	1040,4	350	1112,7	1151,4	1047,5	1037,4	1145,5
145	1168,9	1256,6	1113,7	977,3	1066,8	355	1123,3	1025,5	974,6	1074,4	1118,2
150	1073,9	981,7	1098,4	1079,8	1077,6	360	1130,7	1120,2	1195,3	981,1	1073,7
155	1283,0	1190,4	1108,3	886,5	970,4	365	1255,0	1100,7	976,5	1178,1	1094,0
160	990,3	963,2	893,6	1009,6	1058,5	370	1179,2	1131,7	1012,4	1144,8	1269,8
165	1112,1	1041,3	1021,5	1149,4	1170,4	375	1256,7	1161,2	1199,5	999,6	1213,6
170	1137,1	1097,6	978,2	1220,2	1058,7	380	1112,1	1041,3	1021,5	1149,4	1170,4
175	1137,7	957,4	1013,5	1138,0	1063,7	385	1038,7	1226,5	1096,0	1146,4	1216,1
180	1011,6	1042,9	957,2	1156,3	1164,4	390	1095,6	1121,0	1174,4	1134,8	908,9
185	1129,5	1081,0	1023,5	1167,7	1055,7	395	1274,6	1186,2	1121,7	1228,6	1139,2
190	1177,0	1186,3	1079,1	966,5	1013,8	396	1291,9	1197,2	1198,4	1135,4	1202,9
195	1222,9	1121,3	1003,5	1084,1	887,4						

Velikost otupení vrtáku [mm]:						Velikost otupení vrtáku [mm]:					
č. díry	VB <sub>H1</sub>	VB <sub>H2</sub>	VB <sub>P</sub>	VL <sub>V1</sub>	VL <sub>V2</sub>	č. díry	VB <sub>H1</sub>	VB <sub>H2</sub>	VB <sub>P</sub>	VL <sub>V1</sub>	VL <sub>V2</sub>
1	0	0	0	0	0	200	0,2	0,1	0,2	11,3	0
5	0	0	0	0	0	205	0,2	0,1	0,2	11,3	0
10	0	0	0	0	0	210	0,2	0,1	0,2	11,3	0
15	0,05	0	0	0	0	215	0,2	0,1	0,2	11,3	0
20	0,05	0	0	0	0	220	0,2	0,1	0,25	11,3	0
25	0,1	0	0	7	0	225	0,2	0,1	0,25	11,3	0
30	0,1	0	0,05	7	0	230	0,2	0,1	0,25	11,3	0
35	0,1	0	0,05	7	0	235	0,2	0,1	0,3	11,3	0
40	0,1	0	0,05	7	0	240	0,2	0,1	0,3	12	0
45	0,1	0	0,05	7	0	245	0,2	0,1	0,3	12	0
50	0,1	0	0,05	7	0	250	0,2	0,1	0,3	13,4	0
55	0,1	0	0,05	7	0	255	0,2	0,1	0,3	13,4	0
56	0,1	0	0,05	7	0	260	0,2	0,1	0,3	13,4	0
60	0,1	0	0,1	7	0	265	0,2	0,1	0,3	13,4	0
65	0,1	0	0,1	7	0	270	0,2	0,1	0,3	13,4	0
70	0,1	0	0,1	7	0	275	0,2	0,1	0,35	13,7	0
75	0,1	0	0,1	7	0	280	0,2	0,1	0,35	13,7	0
76	0,1	0	0,1	7	0	285	0,2	0,1	0,35	13,7	0
80	0,1	0	0,1	8	0	290	0,2	0,1	0,35	13,7	0
85	0,1	0	0,1	9	0	295	0,2	0,1	0,35	14	0
90	0,1	0	0,1	9	0	300	0,2	0,1	0,35	14	0
95	0,15	0	0,1	9	0	305	0,2	0,1	0,35	14	0
100	0,15	0	0,1	9	0	310	0,2	0,1	0,4	14	0
105	0,15	0	0,1	9	0	315	0,2	0,1	0,4	14	0
110	0,15	0	0,1	10	0	320	0,2	0,1	0,4	14	0
115	0,15	0,05	0,1	10	0	325	0,2	0,1	0,4	14	0
120	0,15	0,05	0,1	10	0	330	0,2	0,1	0,4	14	0
125	0,15	0,05	0,1	10	0	335	0,25	0,1	0,4	14,2	0
130	0,15	0,05	0,1	10	0	340	0,25	0,1	0,4	14,2	0
135	0,15	0,05	0,15	10	0	345	0,25	0,1	0,4	14,2	0
140	0,15	0,05	0,15	10	0	350	0,25	0,1	0,4	14,2	0
145	0,15	0,05	0,15	10	0	355	0,25	0,1	0,45	14,2	0
150	0,15	0,1	0,15	10	0	360	0,25	0,1	0,45	14,2	0
155	0,15	0,1	0,15	10	0	365	0,25	0,1	0,45	14,2	0
160	0,15	0,1	0,15	10	0	370	0,25	0,1	0,45	14,2	0
165	0,15	0,1	0,2	10	0	375	0,25	0,1	0,45	14,2	0
170	0,15	0,1	0,2	11,3	0	380	0,25	0,1	0,45	15	0
175	0,2	0,1	0,2	11,3	0	385	0,25	0,1	0,45	16,3	0
180	0,2	0,1	0,2	11,3	0	390	0,25	0,15	0,45	16,3	0
185	0,2	0,1	0,2	11,3	0	395	0,3	0,15	0,5	50	50
190	0,2	0,1	0,2	11,3	0	396	0,3	0,15	0,5	50	50
195	0,2	0,1	0,2	11,3	0						

	Aritmetický průměr z pěti naměřených hodnot					Aritmetický průměr z pěti naměřených hodnot		
č. díry	Ra [μm]	Rz [μm]	Rt [μm]		č. díry	Ra [μm]	Rz [μm]	Rt [μm]
1	3,27	17,33	19,36		340	5,27	28,2999	31,4092
2	3,22	17,066	19,159		350	5,24	28,1388	31,2304
3	3,28	17,384	19,516		360	5,31	28,5147	31,6476
4	3,21	17,0451	19,0995		370	5,39	28,9443	32,1244
5	3,23	17,119	19,2185		380	5,37	27,92	35,44
10	3,35	17,755	19,9325		395	6,03	32,56	37,38
15	3,31	17,6092	19,6945		396	6,1	34,03	39,34
20	3,33	17,649	19,8135					
25	3,16	16,75	18,7					
30	3,22	17,066	19,0302					
40	3,29	17,437	19,4439					
50	3,34	17,702	19,7394					
60	3,56	19,22	21,36					
70	3,43	18,522	20,4428					
80	3,66	19,764	21,8136					
90	3,59	19,386	21,3964					
100	3,72	20,1996	22,1712					
110	3,83	20,682	22,8268					
120	3,71	20,034	22,1116					
130	3,68	19,872	21,9328					
140	3,59	19,386	21,3964					
150	3,65	19,16	22,27					
160	3,8	18,23	22,01					
170	3,77	19,98	23,37					
180	3,84	20,73	25,38					
190	3,76	20,116	22,4472					
200	3,91	20,9185	23,3427					
210	3,99	21,3465	23,8203					
220	3,88	20,758	23,668					
230	4,01	20,12	26,01					
240	3,79	20,2007	23,119					
250	4,32	23,0256	26,352					
260	4,21	22,4393	25,681					
270	4,48	23,9232	27,328					
280	4,66	24,8378	28,426					
290	4,83	25,7439	29,463					
300	5,07	27,0231	30,927					
310	5,04	27,03	32,76					
320	5,18	27,8166	30,8728					
330	5,23	28,0851	31,1708					